

**Kombiniertes Ultraschall – Luft – Rückspülverfahren  
– ein Verfahren zur chemikalienfreien in situ Reinigung  
getauchter Membranen zur Wasseraufbereitung –**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät  
im Fachbereich Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Darmstadt

vorgelegt von  
Sonja Lauterborn M.A.  
aus Göttingen

D17

Darmstadt, im Juli 2012

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Cornel  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Gimbel

Tag der Einreichung: 8. April 2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 3. November 2011

## Kurzzusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit von Membranen zur Wasserfilterung in qualitativer sowie quantitativer Hinsicht hängt in starkem Maße von den durchflusslimitierenden Belagschichten ab. Zur Minimierung dieser Belagschichten werden Prozesse wie Rückspülung und/oder Blasenüberströmung eingesetzt. Die Membranwerkstoffe werden in ihren Oberflächen modifiziert, so dass sie besonders schmutzabweisend sind. Dennoch sind oft erhebliche Mengen an Chemikalien zur Reinigung der Membranoberflächen und auch Außerbetriebnahmen der Membrananlagen notwendig, um zumindest einen Großteil der ursprünglichen Leistungsfähigkeit wiederherzustellen.

Da mit Hilfe von Ultraschall eine Möglichkeit besteht, gründlich, chemikalienfrei und während des Betriebs zu reinigen, wurden bereits in der Vergangenheit zahlreiche Versuche zur Ultraschallreinigung von Membranen unternommen. Neben positiven Effekten, wie zum Beispiel der Flusserhöhung, kam es jedoch immer wieder auch zu Membranzerstörungen. Ebenfalls war der hohe Energieverbrauch für den Ultraschalleinsatz in der Diskussion.

Mit Hilfe einer Versuchsanlage im realen Betrieb wird in dieser Arbeit dargelegt, wie die Anlagenanordnung, Parametereinstellungen und Verfahrensabfolgen realisiert werden müssen, um die Reinigungsprozesse mit Ultraschall so zu gestalten, dass eine optimale Membranleistung erhalten wird. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf den Nachweis zur Membranintegrität gelegt, welche über kontinuierliche Trübungsmessung, Partikelzählung, chemisch-mikrobiologische Analysen und Blasentests zur Membrandichtigkeit dokumentiert wird.

Mit der gewählten Versuchsanordnung kann gezeigt werden, dass durch einen nur kurzzeitigen Einsatz von Ultraschall an einer geeigneten Stelle in der Verfahrensabfolge eine hohe Membranleistung in quantitativer und qualitativer Hinsicht erhalten werden kann, und zwar im laufenden Betrieb und ohne die Membran zu schädigen. Auch die Filtration von Wasser mit hohen Trübstoffgehalten wird mit Hilfe von Ultraschall möglich. Das zeigt der parallele Versuch mit einer Vergleichsmembran, deren Betrieb ohne Ultraschall aufgrund von Verblockung nicht möglich war. Durch den nur kurzzeitigen Einsatz des Ultraschalls während der Rückspülung ist der Energiebedarf gering und das Verfahren damit auch wirtschaftlich interessant. Denn: In den hier dargestellten Ergebnissen vereinigt die Ultraschallreinigung sämtliche Vorteile auf sich: langfristiger, chemikalienfreier, fortlaufender Betrieb ohne Membranschädigung und Wartung bei geringem Energieverbrauch.

Zum Abschluss enthält die Arbeit ein Kapitel mit einem Modellentwurf zu einer energieautarken, mit Solar- und Windenergie betriebenen, Membrananlage mit Ultraschallreinigung, die die potentielle Einsetzbarkeit einer solchen Anlage, z.B. in entlegenen Gebieten ohne Zugang zu sauberem Trinkwasser oder für Notfallversorgungen, aufzeigt.

Das Kapitel „Ausblick und weiterer Forschungsbedarf“ dokumentiert, dass die Forschung hier erst am Anfang steht, jedoch ein großes Potential für weitere Anwendungen bietet.

## Summary

The performance of membranes in water treatment plants strongly depends on limiting cake layers, both with respect to quality and quantity. To minimise the thickness of these layers mainly backflushing and or bubble aerating are used. Moreover, the surfaces of the membrane materials are modified for making them dirt repulsive. Nevertheless, often large amounts of chemicals are necessary to clean the membrane surfaces with even the shutdown of the treatment plant for recovering a substantial part of the original membrane performance.

In the past, much research has been done to investigate the idea of cleaning membrane surfaces efficiently, without chemicals and while operating with the help of ultrasound. However, in addition to positive effects, for example flux enhancement, also membrane damage was observed. Additionally, high energy consumption is under discussion.

With the help of a pilot plant under real operation conditions this work shows by way of example, how plant configuration, adjustment of parameters and process sequences may be combined to realize ultrasonic cleaning for optimal membrane performance. Special attention is devoted to membrane integrity that is documented by turbidity measurements, particle counting, chemical and microbiological analyses and bubble tests for excluding leakage of the membrane modules.

With the pilot plant developed it can be shown that with just short time sonication introduced at an appropriate location of the process high and sustained membrane performance can be reached pertaining to quality and quantity. This can be achieved while processing and without membrane damage. The ultrasonic cleaning process can even be extended to the filtration of water with high turbidity. Without application of ultrasound a second membrane module used for process comparison failed because of membrane blocking. Short sonication (while backflushing) keeps energy consumption low and adds economic interest. As a result of this work it can be stated that membrane cleaning with ultrasound earns all benefits: long term, chemical free, continuous operation without membrane damage or maintenance in addition to low energy consumption.

Finally, this work contains a chapter with a model water treatment plant designed for energy autarky by use of solar and wind energy only. The plant incorporates the proposed ultrasonic cleaning system and demonstrates its ability for deployment in regions without access to clean drinking water or for emergency use.

The chapter „Outlook and research requirement“ documents that research is still in its infancy, but opens up great opportunities for extended applications.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	2
<b>2.</b>	<b>Grundlagen, Gesetzmäßigkeiten</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen der Membrantechnologie	4
2.1.1	Membranverfahren, Einordnung der Ultrafiltration	9
2.1.2	Membranverfahren, Fouling	13
2.1.3	Membranverfahren, Materialien und Module	16
2.1.4	Anlagenparameter	21
2.2	Grundlagen der Ultraschalltechnologie	24
2.2.1	Wirkung des Ultraschalls und Einsatz in der Reinigung	27
2.2.2	Parameterauswahl	33
<b>3.</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>36</b>
3.1	Aufgabenstellung	41
<b>4.</b>	<b>Experimenteller Teil</b>	<b>42</b>
4.1	Die Versuchsanlage	42
4.2	Die Versuchsreihen	47
4.2.1	Inbetriebnahme, die Wirkung von Spülluft	48
4.2.2	Erste Versuche mit Ultraschall	50
4.2.3	Versuche mit Ultraschall beim Rückspülprozess – Das USL-Verfahren	51
4.2.4	Versuchsreihe 1: Einsatz von 130 kHz Ultraschall und vorgereinigtem Rohwasser mit steigender Konzentration im Filtrationstank	53
4.2.5	Versuchsreihe 2: Einsatz von 130 kHz Ultraschall und vorgereinigtem Rohwasser mit gleichbleibender Konzentration im Filtrationstank	55
4.2.6	Versuchsreihe 3: Einsatz von 35 kHz	61

4.2.7	Versuchsreihe 4: Variation der Beschallungsdauer	66
4.2.8	Versuchsreihe 5: Leistungsfähigkeit des USL-Verfahrens bei neuen und verschmutzten Membranen	67
4.2.9	Versuchsreihe 6: Variation der Ultraschall-Leistung	76
4.2.10	Versuchsreihe 7: Einsatz von nicht vorgereinigtem Rohwasser	78
4.3	Bewertung der Ergebnisse der Versuchsreihen	91
4.4	Energetische Betrachtung, Einsparpotential	100
<b>5.</b>	<b>Solar-Wind betriebene, autarke Anlage – ein Modell</b>	<b>104</b>
5.1	Aufbau der Anlage	104
5.2	Berechnungen	106
5.3	Ergebnisbetrachtung	117
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>119</b>
6.1	Zusammenfassende Betrachtung	119
6.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	121
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>123</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>129</b>
	<b>Wissenschaftlicher Werdegang</b>	<b>130</b>
	<b>Anhang I</b>	<b>131</b>
	<b>Anhang II</b>	<b>134</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Unterschiedliche Betriebsweisen von Membranen: In/Out-Betrieb und Out/In-Betrieb	5
Abbildung 2:	Unterschiedliche Betriebsweisen von Membranen: Dead-End-Betrieb und Cross-Flow-Betrieb	6
Abbildung 3:	Druckmembranverfahren und getauchtes Membransystem	7
Abbildung 4:	Größenordnung abtrennbarer Stoffe bei den verschiedenen Membranverfahren (nach Microdyn-Nadir)	10
Abbildung 5:	Foulingmechanismen bei der Filtration über poröse Membranen (aus Melin und Rautenbach, 2004)	14
Abbildung 6:	Begriffe des Membranprozesses	22
Abbildung 7:	Schema der Abfolge des Filtrationszyklus	23
Abbildung 8:	Begriffe aus der Wellenlehre, dargestellt anhand einer harmonischen Schwingung	24
Abbildung 9:	„Schallbereiche“	25
Abbildung 10:	a) Streamerfigur (Filament) (Luther, 2000) b) Kavitationsstrukturen bei 130 kHz (DPI Göttingen 2007)	30
Abbildung 11:	Mikrojet. Der Flüssigkeitsstrahl schießt von oben nach unten durch die Blase und ist in Richtung einer festen Wand ausgerichtet (W. Lauterborn et al, 1999).	31
Abbildung 12:	„Frequenzstrahl“ in logarithmischer Skala	33
Abbildung 13:	Blick von oben auf die Versuchsanordnung	42
Abbildung 14:	links: Membranmodul Biocel (BC-10) rechts: Querschnitt durch die Ultrafiltrationsmembran. Die trennaktive Schicht (oben) ist verbunden mit der porösen PE-Stützschiicht (unten). Beide Abbildungen mit freundlicher Genehmigung der Fa. Microdyn-Nadir	43
Abbildung 15:	Die Versuchsanlage am Standort Biebesheim Oben rechts: ein neues Membranmodul nebst Anschlüssen als getauchtes Modul, eingehängt in den Filtrationstank Unten rechts: das Membranmodul und die von ihm abgetrennten Rückstände (hier vorwiegend Flockungsmittel)	45
Abbildung 16:	Aufbau der Versuchsanlage	46
Abbildung 17:	Der Betrieb beider Membranmodule mit Luftblasenüberströmung während der Rückspülung. Es stellen sich konstante Unterdruckwerte um 150 mbar ein (rote Linie) .	49
Abbildung 18:	Der Betrieb ohne Luftblasenüberströmung beider Membranmodule. Es zeigt sich eine deutliche Zunahme des Unterdruckes (rote Linie).	49
Abbildung 19:	Ultraschallreinigung mit gleichzeitiger Luftrückspülung und im kombinierten Verfahren nacheinander geschaltet	51

Abbildung 20: Erster Handversuch mit dem kombinierten Ultraschall-Luft-Rückspülverfahren (kurz: USL-Verfahren). Die Druckwerte entsprechen Punkt 4 aus Abb. 19.	52
Abbildung 21: Die mit USL-Verfahren betriebene Linie 1 läuft über 16 Tage konstant durch, während Linie 2 (ohne Ultraschall) immer wieder in kurzer Zeit ausfällt.	54
Abbildung 22: Vergleich der Permeabilität der Linie mit USL-Verfahren mit der Linie ohne Ultraschalleinsatz während der Versuchsreihe 2	56
Abbildung 23: Verlauf der Trübungswerte der Linie mit USL-Verfahren während der Versuchsreihe 2	57
Abbildung 24: Verlauf der Partikelzahlen während des Versuchs Oben: Partikelzahlen zu Beginn, unten: Partikelzahlen im Verlauf	59
Abbildung 25: Ein Ausschnitt aus der Versuchsreihe zeigt, dass bei geringerem Unterdruck während der Filtration (Permeabilitätsverbesserung) die Trübung niedrigere Werte zeigt (Qualitätsverbesserung).	60
Abbildung 26: Der Abfall der transmembranen Druckdifferenz ist jeweils deutlich erkennbar, wenn anstelle von 130 kHz, 35 kHz eingesetzt werden.	62
Abbildung 27: Die Rückspülpeaks bei kurzfristiger Beschallung mit 35 kHz und 2800 Watt (70 %) Leistung	63
Abbildung 28: 20 h Versuch mit 35 kHz und 2000 Watt (50%) Leistung und Rückspülungen mit 35 kHz und 4000 Watt (100%) Leistung	63
Abbildung 29: Versuchsaufbau im Labormaßstab Links: Beschallung der Membran mit 130 kHz, Kavitationsblasenschleier befinden sich zwischen den Membranen Rechts: Beschallung der Membran mit 35 kHz, keine Kavitations- blasenfelder zwischen den Membrantaschen, nur außerhalb (Abbildung Drittes Physikalisches Institut der Universität Göttingen 2007)	64
Abbildung 30: Der Einfluss unterschiedlicher Beschallungsdauer im USL-Verfahren bei 130 kHz und 4000 Watt (100 %) Leistung und der Vergleich zum Betrieb ohne Ultraschall.	67
Abbildung 31: Unterschiedliche Betriebsweisen bei neuen Membranen. USL-Verfahren (blau), ohne Ultraschall (rot)	69
Abbildung 32: Die Trübungswerte analog zur Abbildung 31	70
Abbildung 33: Von Anfang an mit USL-Verfahren behandeltes Membranmodul. Die weißen Flächen sind vollständig abgereinigt	71
Abbildung 34: Permeabilitätsverlauf der Membran mit Ultraschallreinigung, nachdem diese vorher ein Jahr lang ohne Ultraschall in Betrieb war.	72
Abbildung 35: Die Trübung am Beginn der Ultraschallbehandlung der bis dahin unbehandelten Membran.	73
Abbildung 36: Permeabilitätsverlauf der verschmutzten Membran mit Ultraschall- reinigung während des zweiten Versuchsabschnittes (17. bis 25. Versuchstag).	74
Abbildung 37: Die Trübungswerte vom 17. bis 25. Versuchstag	74

Abbildung 38: Intensivreinigung mit Ultraschall der nur kurzzeitig und gering verschmutzten Membran	75
Abbildung 39: Trübung der erst kurzzeitig verschmutzten Membran mit Einsatz von Ultraschallreinigung. Der deutlich erkennbare Sprung am ersten Versuchstag ist bedingt durch die Reinigung des Trübungsmessgerätes	76
Abbildung 40: Verlauf der Permeabilität mit einer Ultraschall-Leistung von 2000 Watt und von 1000 Watt	77
Abbildung 41: Verlauf der Trübung analog zur Permeabilitätskurve der Abbildung 40	78
Abbildung 42: Befüllungshöhe im Filtrationstank vor und nach dem Umbau	79
Abbildung 43: Die erste Filtration mit nicht vorgereinigtem Rohwasser	81
Abbildung 44: Trübungsverlauf während der ersten Versuche mit nicht vorgereinigtem Rohwasser	82
Abbildung 45: Wasserproben der Anlage Links: Rohwasser von 100 FNU Rechts: daraus durch die Membrananlage (mit USL-Verfahren) gereinigtes Wasser von 0,06 FNU	83
Abbildung 46: Permeabilität bei der Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach 3-monatiger Relaxationsphase	85
Abbildung 47: Verlauf der Trübung während der Filtrationsreihe von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach Relaxation	85
Abbildung 48: Verlauf der Permeabilität während des zweiten Abschnitts der Versuchsreihe mit nicht vorgereinigtem Rohwasser nach der Relaxationsphase	88
Abbildung 49: Verlauf der Trübung während des zweiten Versuchsabschnittes mit nicht vorgereinigtem Rohwasser	88
Abbildung 50: Verlauf der Permeabilität während des dritten Versuchsabschnittes der Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach der Relaxationsphase	90
Abbildung 51: Verlauf der Trübung während des dritten Versuchsabschnittes der Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach der Relaxationsphase	90
Abbildung 52: Ablaufschema des USL-Verfahrens	91
Abbildung 53: a) Modell des Schallfeldes als Stehwellenfeld zwischen zwei Membrantaschen. Die Blasenschicht befindet sich im Bereich der Schallbäuche, der Bereich der Schallknoten befindet sich auf den Membranoberflächen b) Schema des Reinigungsmechanismus durch oszillierende Blasen in Minnaert-Größe, gemäß des Ausschnittes aus Abb. 53 a	90 95
Abbildung 54: Anlagenaufbau der Solar-Wind betriebenen Anlage	106
Abbildung 55: links: Foto des Inclin 3000 ( <a href="http://www.heyde-windtechnik.de/inclin.htm">www.heyde-windtechnik.de/inclin.htm</a> ), rechts: Leistungskurve der Windkraftanlage (nach: <a href="http://www.kleinwindanlagen.de/html/inclin_3000.html">www.kleinwindanlagen.de/html/inclin_3000.html</a> )	115

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Membranwerkstoffe und ihre Eigenschaften	18
Tabelle 2: Membranmodule im Überblick	19
Tabelle 3: Spezifischer Membranfluss und TMP der neuen Membranen	68
Tabelle 4: Resonanzradius und optimaler Membrantaschenabstand in Abhängigkeit von der Frequenz	99
Tabelle 5: Elektrische Daten und Laufzeiten der Anlagenkomponenten	107
Tabelle 6: Energiebedarf in Phase 1 (Filtrationsphase) und maximale Stromflüsse	108
Tabelle 7: Energiebedarf in Phase 2 und 5 (Relaxationsphase) und maximale Stromflüsse	108
Tabelle 8: Energiebedarf in Phase 3 (Rückspülung mit Ultraschall) und maximale Stromflüsse	109
Tabelle 9: Energiebedarf in Phase 4 (Rückspülung mit Luftüberströmung) und maximale Stromflüsse	110
Tabelle 10: Globalstrahlung über die Monate und Energieausbeute über die Solarzellenanlage	113
Tabelle 11: Mit Hilfe des Windgenerators Inclin 3000 gewonnene Windenergie (berechnet) über die Windklassen für das Winterhalbjahr der Messstelle Fürth im Odenwald	115
Tabelle 12: Mit Hilfe des Windgenerators Inclin 3000 gewonnene Windenergie (berechnet) über die Windklassen für das Sommerhalbjahr der Messstelle Fürth im Odenwald	116
Tabelle 13: Gesamtversorgung aus Solar- und Windenergie der Modellanlage im Sommer und im Winter	116

## Abkürzungen

A	= Ampère
Abb.	= Abbildung
AC	= Wechselstrom
Ah	= Ampèrestunden
AOX	= adsorbierbare, organisch gebundene Halogene
BC-10	= Biocel-Membranmodul mit 10 m <sup>2</sup> Membranfläche (des Membranherstellers Microdyn-Nadir in Wiesbaden)
DC	= Gleichstrom
DOC	= dissolved organic carbon (organischer Kohlenstoff in gelöster Form)
DPI	= Drittes Physikalisches Institut (der Universität Göttingen)
€	= Euro
EPS	= extrazelluläre polymere Substanzen
FeCl <sub>3</sub>	= Eisen-III-chlorid (Flockungsmittel)
FNU	= Formazin Nephelometric Units (Einheit zur Trübungsmessung, geeicht an Formazinlösung)
GHz	= Gigahertz (Frequenz im Hyperschallbereich)
h	= Stunde
HLUG	= Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Hz	= Hertz (1 Hertz = 1 Schwingung pro Sekunde)
ISO	= Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization)
K	= Kelvin (absolute Temperaturskala)
kD	= kiloDalton (entspricht dem Molekulargewicht, 1 kD = 1000 g/mol)
kg	= Kilogramm
kHz	= Kilohertz (Frequenzen über 20 kHz: Ultraschallbereich)
kW	= Kilowatt
kWh	= Kilowattstunden
L	= Liter
MF	= Mikrofiltration
MHz	= Megahertz (Hochfrequenzultraschall)
min	= Minute
MWCO	= molecular weight cut off (Trenngrenze nach Molekulargewicht)

NF	= Nanofiltration
NOM	= natural organic matter (organische Bestandteile natürlicher Herkunft)
PAN	= Polyacrylnitril
PE	= Polyether
PES	= Polyethersulfon
PP	= Polypropylen
PS	= Polysulfon
PVDF	= Polyvinylidendifluorid
RL	= Rückhalteleistung der Membran
RO	= Umkehrosmose (Reversosmose)
RTM	= Rastertunnelmikroskop
SDI	= silt density index (Belagindex)
sec	= Sekunde (SI-Einheit: s)
SPS	= speicherprogrammierbare Steuerung
T	= Temperatur
Tab.	= Tabelle
THz	= Terahertz (Frequenz im Hyperschallbereich)
TL	= Trennleistung der Membran
TMP	= trans membrane pressure (transmembrane Druckdifferenz)
UF	= Ultrafiltration
UP 150T	= Typ der verwendeten Ultrafiltrationsmembran des Membranherstellers Microdyn-Nadir (Wiesbaden)
US	= Ultraschall
USL	= kombiniertes Ultraschall-Luft-Rückspülverfahren
UV	= ultraviolett (Licht)
V	= Volt
VDI	= Verein Deutscher Ingenieure
Wh	= Wattstunden
WHO	= Weltgesundheitsorganisation (world health organization)
WHR	= Wasserverband Hessisches Ried
W <sub>p</sub>	= Watt peak (Leistung der Solarzelle unter Standard-Testbedingungen, Zelltemperatur: 25°C, Bestrahlungsstärke: 1000 W/m <sup>2</sup> )



## Formelzeichen

$A$	= Membranfläche [m <sup>2</sup> ]
$A_s$	= Fläche des eingestrahlten Schalls [cm <sup>2</sup> ]
$b$	= Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$c$	= Schallgeschwindigkeit [m/s]
$d$	= Membrantaschenabstand [mm]
$f$	= Frequenz [Hz]
$f_c$	= Grenzfrequenz [kHz]
$h_1$	= Höhe berechnet [m]
$h_2$	= Höhe gemessen [m]
$I_s$	= Intensität (Schall) [W/cm <sup>2</sup> ]
$I$	= Stromstärke [A]
$P$	= Leistung [W]
$p$	= Druck [mbar], [bar], [Pa] = [N/m <sup>2</sup> ], (1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa)
$p_e$	= Eingangsdruck (Druck auf der Feedseite der Membran) [bar]
$p_a$	= Ausgangsdruck (Druck auf der Permeatseite der Membran) [bar]
$p_{max}$	= maximaler Unter- bzw. Überdruck (bezogen auf den TMP) [bar]
$Pe$	= Permeabilität [L/(m <sup>2</sup> •h•bar)]
$Q$	= Fluss durch die Membran [L/h]
$Q_s$	= spezifischer Membranfluss (Membranbeaufschlagung) [L/(m <sup>2</sup> •h)]
$q$	= Schallfluss [m <sup>3</sup> /s]
$R$	= Resonanzradius der Blase [μm]
$RL$	= Rückhalteleistung der Membran [%]
$T$	= Temperatur [°C]
$T$	= Schwingungsperiode [s]
$TL$	= Trennleistung der Membran [kD]
$TMP$	= transmembrane Druckdifferenz [mbar]
$U$	= Spannung [V]
$v$	= Schallschnelle [m/s]
$v_1$	= Windgeschwindigkeit berechnet [m/s]
$v_2$	= Windgeschwindigkeit gemessen [m/s]
$Z$	= Schallimpedanz [Ns/m <sup>3</sup> ]
$z_0$	= Rauigkeitsklasse (Rauigkeitslänge) nach EU-Windatlas
$\zeta$	= Zeta-Potential [mV]
$\eta$	= Rohwasserausbeute [%]
$\Theta$	= Kontaktwinkel [°]

- $\kappa$  = Polytropenexponent des Gases in der Blase  
 $\lambda$  = Wellenlänge (Schallwelle) [cm]  
 $\rho$  = Dichte des Mediums [kg/m<sup>3</sup>]

# 1. Einführung

Membranverfahren sind für die Trinkwasserproduktion bereits heute von großer Bedeutung (Gimbel et al., 2007). Während die Umkehrosmose als klassische Form der Meerwasserentsalzung bereits seit 30 Jahren angewandt wird und die Zahl der Anlagen und die aufbereitete Kapazität seitdem stetig ansteigt (Gimbel und Hagmeyer, 2003), hat der Einsatz von Mikro- und Ultrafiltrationsanlagen im Bereich der Trinkwasseraufbereitung gerade in jüngerer Zeit, seit etwa 1997, einen exponentiellen Anstieg zu verzeichnen, u.a. auch durch die ökonomische Vergleichbarkeit mit konventionellen Verfahren. Dies ließ sich neben vereinfachtem Engineering und guter Automatisierbarkeit, dadurch realisieren, dass der Membranpreis etwa in der Dekade von 1993-2003 auf nahezu ein Zehntel gesunken ist (Gimbel und Hagmeyer, 2003). Die weltweit am häufigsten eingesetzte Rohwasserressource zur Aufbereitung von Trinkwasser über Mikro- und Ultrafiltrationsanlagen ist Oberflächenwasser. Hier geht es hauptsächlich um die zuverlässige Entfernung von Mikroorganismen (Gimbel et al., 2007). Weiterhin werden diese Verfahren zur Vorbehandlung bei der Umkehrosmose eingesetzt, um einen konstanten SDI (silt density index) zu gewährleisten, der das Maß für die Foulingneigung eines Wassers angibt. Mit konventionellen Verfahren, wie Chemikalienzugabe mit anschließender Sandfiltration, ist ein konstanter Wert nicht immer einzuhalten (Melin et al., 2005). Weitere Anwendungsbereiche sind industrielle Trennverfahren, wie sie z.B. in der Lebensmittelindustrie (Getränkeindustrie, Milchverarbeitung) genutzt werden. Entsprechend einem breiten Anwendungsspektrum gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Membranmaterialien, deren Palette durch Forschung und Entwicklung ständig erweitert wird.

Die Mikro- und Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung wird entweder in druckgetriebenen Verfahren realisiert oder mit sog. getauchten Membranen, bei denen das Filtrat im Unterdruck abgezogen wird. Die Verfahren mit getauchten Membranen haben dabei noch einen geringen Anteil, wie das Beispiel der Bundesrepublik Deutschland mit 13,5% aller bis Ende 2006 registrierten Anlagen zeigt (Lipp, 2007). Getauchte Membransysteme wurden für Rohwässer mit hohen Trübstofffrachten entwickelt und wurden deshalb zuerst im Bereich der Abwassertechnik eingesetzt. Je größer die Trübstofffracht ist, umso größer ist in der Regel auch die Foulingneigung. Als Fouling wird grundsätzlich die leistungsmindernde Verschmutzung der Membranoberflächen verstanden (Melin und Rautenbach, 2004). Diese kann durch Deckschichtbildung auf der Membranoberfläche, wie auch durch Porenverblockung oder Porenverengung, die in der Regel schwerer entfernbar sind, entstehen. Fouling kann dabei durch Ablagerung von Partikeln, organischen Substanzen, Ausfällung von Mineralien oder auch durch die Anheftung und das Wachstum von Mikroorganismen, welches als sog. Biofouling bezeichnet wird, entstehen. Biofouling kann hohe Kosten verursachen, wie das Beispiel einer Umkehrosmoseanlage in Kalifornien, bei der die direkten, wie auch indirekten Biofouling-Kosten etwa 30% der gesamten Betriebskosten ausmachen, zeigt (Flemming, 1995). Derzeit wird die Foulingproblematik hauptsächlich mit Chemikalien bekämpft. Hierbei ist neben Kosten und Umweltbelastungen zu bedenken, dass

durch den Angriff der Chemikalien die Standzeit der Membranen verringert und die Leistung im Hinblick auf Fluss und Trennleistung vermindert werden kann (Melin und Rautenbach, 2004). Das Leistungsmaß im Hinblick auf den Fluss [ $L/(m^2 \cdot h)$ ] ist dabei die Permeabilität [ $L/(m^2 \cdot h \cdot bar)$ ] der Membran, im Hinblick auf die Trennleistung der Rückhalt von bestimmten Indikatorsubstanzen bzw. die Angabe der Trübung in FNU oder die Angabe von Partikelzahlen.

Die Reinigung von Oberflächen mit Ultraschall (Olaf, 1957) hat sich bereits bewährt, wenn man z.B. an die Reinigung von Brillen oder optischen Gläsern denkt (Kuttruff, 1988, S. 366). Andere Anwendungen sind die Waferreinigung in der Elektronik (Kim et al., 2009; Vereecke et al., 2005), die Zahnsteinentfernung (Felder et al., 2009) oder Nierensteinzertrümmerung (Pishchalnikov et al., 2003; Eisenmenger, 2001) in der Medizintechnik, der Aufschluß von Zellen z. B. von Bakterien in der Biologie (Miller et al., 1996), Be- und Entschichtungsprozesse in der Galvanik (Kuttruff 1988, S. 367), die Reinigung von Textilien (Gallego-Juarez et al., 2010) oder auch vielfältige Prozesse in der Chemie, wie Reaktionsbeschleunigung, Emulgieren oder Homogenisieren (Mason, 1999; Suslick, 1988; Richards und Loomis, 1927). Auch im Bereich der Membranreinigung stellt dies eine Anwendungsmöglichkeit dar (Muthukumaran et al., 2006; Kyllönen et al., 2005; Lamminen et al., 2004).

Durch den Einsatz von Ultraschall können in effektivem Maße kleinste Partikel von Oberflächen abgelöst werden. Die Reinigung erfolgt dabei über die durch den Ultraschall induzierte Kavitation, bzw. Kavitationsblasenfelder, die für die Abreinigung verantwortlich sind. „Alle verfahrenstechnischen Anwendungen der Kavitation haben einen deutlichen Nutzen für die Umwelt und tragen zur Einsparung von Energie bei. So werden technische Anwendungen der Kavitation gerade in denjenigen Bereichen entwickelt, die hohen Umweltauflagen unterliegen.“ „Positiv wird der Problemlösungsbeitrag auch für die Gesundheit gesehen, der durch eine verbesserte Desinfektion, in der Reinigung sowie besserer Trinkwasserqualitäten durch Aufbereitungsprozesse gegeben ist“ (VDI, BMBF, 2000). Eine Desinfektion von Wasser ist mittels Ultraschall möglich, und zwar über die Deaktivierung von Bakterien und Mikroorganismen durch Aufbrechen der Zellwände (Ashokkumar et al., 2003). Der Vorteil ist hier, dass dies auch für trübstoffreiche Wässer möglich ist, im Gegensatz zur UV-Bestrahlung, bei der sie möglichst trübstofffrei sein müssen.

## **1.1 Motivation**

Da auch bei Membranverfahren vielfach die Anwendung von Reinigungschemikalien unerwünscht oder nicht möglich ist, bzw. mit erheblichen Entsorgungskosten durch immer strengere Umweltauflagen verbunden wäre, ist es als besonders sinnvoll an-

zusehen ein Verfahren zu entwickeln, bei dem auf Reinigungschemikalien vollständig verzichtet und welches möglichst während des Betriebes durchgeführt werden kann. Weitere Aspekte sind, dass die Membran nicht nachteilig verändert oder gar beschädigt und die Trennleistung nicht negativ beeinflusst werden darf. Im Zuge der immer größeren Energiepreissteigerungen ist grundsätzlich der Fokus auf eine Energieoptimierung der gesamten Anlage auszurichten. Ein Verfahren wird nur dann wirtschaftlich anwendbar sein, wenn die Gesamtkosten, von denen der Energieverbrauch ein wichtiger Anteil ist, möglichst gering im Vergleich zu anderen Verfahren ist. Höhere Kosten sind in der Regel nur vertretbar, wenn das Produkt sich durch besonders hohe Qualität auszeichnet oder Ausschlusskriterien die Anwendung des Verfahrens notwendig werden lassen. Im Zuge der Nachhaltigkeitsdiskussion ist grundsätzlich auf die Optimierung eines Verfahrens im Hinblick auf die Schonung der Umwelt zu achten.

In der Verfahrenstechnik wird bei allen Anwendungen der Ultraschallreinigung als größter Forschungsbedarf das Finden der jeweils optimalen Parameterbereiche genannt. Derzeit können Parametereinstellungen für die technischen Anwendungen der Kavitation noch nicht simuliert werden, da dafür noch genauere Kenntnisse über die Kavitationsfeldverteilung notwendig wären. Das bedeutet, dass bei ultraschallgesteuerten Kavitationsprozessen für jede Anwendung die Parameter Schallfrequenz, Schallintensität, Anwendungsdauer oder auch Geometrie der Anordnung in langwierigen Erprobungen immer neu gefunden werden müssen. Daher kann die Etablierung eines Verfahrens nur über den Betrieb einer Versuchsanlage mit entsprechenden Testreihen erfolgen.

2004 haben laut WHO weltweit 1,069 Mrd. Menschen, das entspricht 16,7% der Weltbevölkerung, keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Während in urbanen Räumen der Anschlußgrad sehr hoch ist, fehlt dieser Zugang vornehmlich in ländlichen Räumen. Oftmals handelt es sich um kleine Siedlungen, bei denen der Anschluss an eine zentrale Trinkwasserversorgung nicht möglich oder eine entsprechende Infrastruktur grundsätzlich nicht vorhanden ist, wie z.B. auf Inseln oder in der Wüste. Hier ist es notwendig, eine flexible und mobile Trinkwasseraufbereitungsanlage einsetzen zu können, die möglichst keine chemischen Rückstände hinterlässt und energieautark arbeiten kann. Interessant wäre es also, eine Membrananlage mit chemikalienfreier Reinigung zu entwickeln, die beispielsweise vollständig über Solar- und Windenergie betrieben werden kann.

## 2. Grundlagen, Gesetzmäßigkeiten

Da in dieser Arbeit die Reinigung von Membranen mit Hilfe von Ultraschall untersucht wird, betrifft dies sowohl das Gebiet der Membrantechnologie einschließlich Membranmaterialien und -modulen sowie Fouling, wie auch das Gebiet der Ultraschalltechnologie mit seinen physikalischen Grundlagen und der Nutzung zur Reinigung.

Daher werden deren Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten, die Relevanz in Bezug zu den folgenden experimentellen Arbeiten besitzen, in diesem Kapitel näher erläutert.

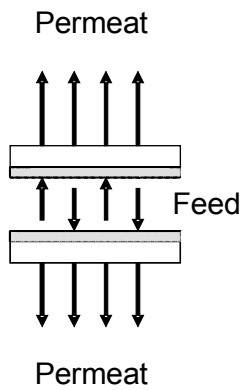
### 2.1 Grundlagen der Membrantechnologie

Membranfiltrationsverfahren werden in der Wassertechnologie, wie auch bei industriellen Trennverfahren eingesetzt. Hierbei können aus flüssigen und gasförmigen Phasen Stoffe abgetrennt werden. Durch die rein physikalische Trennwirkung der Membran werden definierte Stoffe je nach Porengröße oder Dichte der Membran zurückgehalten. Daher wird für die jeweilige Trennaufgabe aus der Vielzahl vorhandener Membranmaterialien die der Trennaufgabe entsprechende ausgewählt.

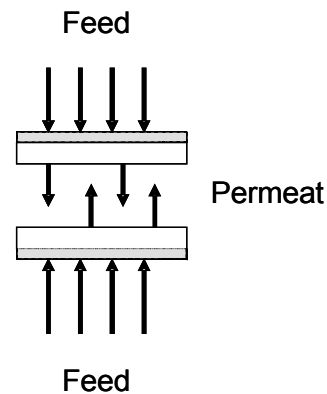
Bei den Membranverfahren gibt es unterschiedliche Betriebsmöglichkeiten. Die wichtigsten Begriffe sollen im Folgenden veranschaulicht werden.

Das zu filtrierende Rohwasser wird dabei als **Feed** bezeichnet. Das erhaltene Filtrat, also z.B. je nach Trennleistung gereinigtes Wasser, wird als **Permeat** bezeichnet. Die auf der Rohwasserseite der Membran aufkonzentrierte wässrige Lösung wird als Konzentrat oder auch **Retentat** bezeichnet (siehe auch Abb. 6, S. 22). Ob die Deckschichtbildung auf der Außenseite der Membran oder auf der Innenseite erfolgt, hängt von der Betriebsweise ab.

Abbildung 1 zeigt dazu zunächst den In/Out-Betrieb und den Out/In-Betrieb.



**In/Out-Betrieb** mit Deckschichtbildung auf der Innenseite (Rohwasserseite) der Membran



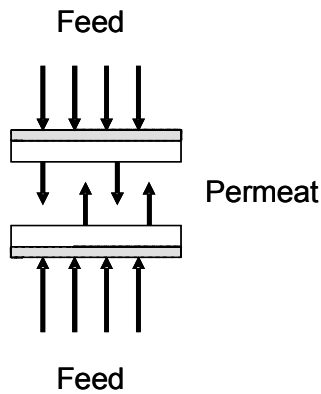
**Out/In-Betrieb** mit Deckschichtbildung auf der Außenseite (Rohwasserseite) der Membran

Abbildung 1: Unterschiedliche Betriebsweisen von Membranen: In/Out-Betrieb und Out/In-Betrieb.

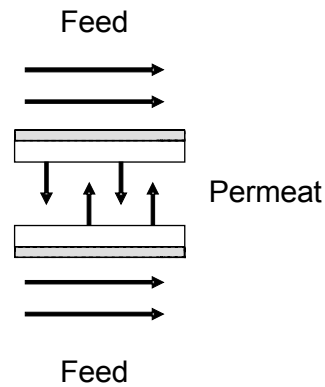
**In/Out-Betrieb:** Bei In/Out betriebenen Membranen findet die Deckschichtablagerung auf der Innenseite der Membranen statt. Diese ist schwerer zugänglich und bei sehr dünnen Kapillaren ist die Gefahr der Verstopfung derselben gegeben. Daher empfiehlt sich, diese Verfahrensvariante bei Rohwässern mit geringer Trübstofffracht anzuwenden. Die Membranen werden in der Regel über Rückspülung oder Spülung (forward flush) und mit Hilfe von Chemikalien gereinigt.

**Out/In-Betrieb:** Bei Out/In betriebenen Membranen findet die Deckschichtablagerung auf der Außenseite der Membranen statt. Das hat den Vorteil, dass die Deckschicht gut zugänglich ist und je nach Betrieb während der Filtration oder auch der Permeatrückspülung unterstützend mit Luftblasenüberströmung abgelöst werden kann. Diese Betriebsweise eignet sich bei Rohwässern mit höheren Trübstoffgehalten und bedingt in der Regel einen geringeren Chemikalienverbrauch.

Weiterhin wird zwischen Dead-End-Betrieb und Cross-Flow-Betrieb (auch Querstromfiltration genannt) unterschieden. Das zeigt Abb. 2.



**Dead-End-Betrieb** einer Out/In betriebenen Membran. Die gesamte Wassermenge wird direkt durch die Membran gedrückt. Daher lagern sich alle Partikel in Form einer Deckschicht auf der Membran ab.



**Cross-Flow-Betrieb** einer Out/In betriebenen Membran. Die Membran wird mit dem Rohwasser überströmt. Das Wasser zirkuliert, somit lagert sich nur ein Teil der Partikel ab.

Abbildung 2: Unterschiedliche Betriebsweisen von Membranen: Dead-End-Betrieb und Cross-Flow-Betrieb.

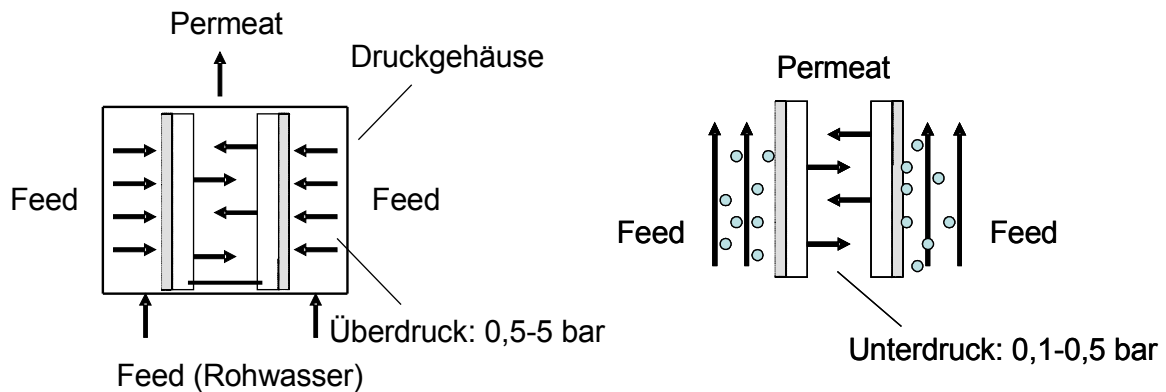
**Dead-End-Betrieb:** Der Dead-End-Betrieb wird auch als statischer Betrieb bezeichnet, da hier das gesamte Rohwasser durch die Membranen gepumpt wird. Somit lagern sich alle im Rohwasser enthaltenen Partikel auf der Membran ab und erzeugen so eine anwachsende Deckschicht, die regelmäßig über Rückspülungen entfernt werden muss, damit der Permeatfluss nicht zu stark abnimmt. Diese Betriebsweise eignet sich für Rohwässer mit geringen Trübstofffrachten oder Partikeln, die gut ablösbare oder poröse Deckschichten bilden.

**Cross-Flow-Betrieb:** Der Cross-Flow-Betrieb wird auch als dynamischer Betrieb bezeichnet. Hier wird die Membran mit dem Feed überströmt, wobei die Überströmgeschwindigkeiten variiert werden können. Somit lagert sich jeweils nur ein Teil der Partikel deckschichtbildend ab, übrige Partikel bleiben in Lösung. Mit der Überströmung wird die Deckschicht kontrolliert, d.h. ein übermäßiges Anwachsen wird verhindert. Diese Betriebsweise eignet sich bei höherer Feststoffbelastung des Rohwassers, sowie bei Stoffen (z.B. bestehend aus sehr feinen Partikeln), die sehr undurchlässige oder schwer ablösbare Deckschichten bilden.

Je nach Einbettung der Membranen wird der Betrieb im Überdruck oder im Unterdruck vorgenommen. Während sich die Membranen bei **Druckmembranverfahren** in einem Druckgehäuse in Form eines Druckrohres befinden, sind die **getauchten Membranen** im offenen Filtrationstank frei eingehängt. Da das Permeat beim getauchten Verfahren über die Innenseite der Membranen mit Saugpumpen abgezogen wird, werden diese im Unterdruck betrieben.



Diese zwei unterschiedlichen Betriebsarten sind in Abbildung 3 gegenübergestellt.



**Druckmembransystem:** Die Membranen befinden sich in einem Druckrohrsystem. Über eine Druckpumpe wird das Feed mit Überdruck, hier im Out/In und Dead-End-Betrieb durch die Membran gedrückt.

**Getauchtes Membransystem (Unterdruckmembran):** Die Membranen sind direkt in das zu filtrierende Rohwasser eingetaucht. Das Permeat wird über eine Saugpumpe auf der Innenseite der Membranen abgezogen. Zusätzlich kann die Außenseite der Membranen mit Luftblasen überströmt werden.

Abbildung 3: Druckmembranverfahren und getauchtes Membransystem.

**Druckmembransystem:** Die notwendige Druckdifferenz für den Filtratfluss wird von außen über Druckpumpen erzeugt. Die Überdrücke können unterschiedlich hoch sein, die Stabilität ist durch das Druckrohr gegeben. Derzeit wird in Deutschland die Mehrzahl der MF und UF-Anlagen, die der Trinkwasseraufbereitung dienen, über Druckmembransysteme betrieben. Das sind 86,5% der Anlagen und 88% des über Membranverfahren aufbereiteten Wassers.

**Getauchtes Membransystem:** Die notwendige Druckdifferenz für den Filtratfluss wird über Saugpumpen realisiert, die das Permeat über die Innenseite der Membranen absaugen. Die Unterdrücke sind dabei im Schnitt geringer als bei den Druckmembranverfahren die jeweiligen Überdrücke. Getauchte Membranen werden in der Regel für Rohwässer mit hohen Trübstofffrachten verwendet. Sie wurden ursprünglich für die Abwassertechnik entwickelt und dort direkt in der Membranbelegung platziert. Der hier benötigte Sauerstoff, der am Fuße der Module eingetragen wird, dient mit der Scherwirkung seiner Luftblasen gleichzeitig der Membranreinigung. Immerhin werden bereits 12% des über Membranen aufbereiteten Wassers in Deutschland mit getauchten Membranen gereinigt.

Die Vorteile der druckbetriebenen Membransysteme liegen in einem höheren spezifischen Membranfluss, also der Menge des pro  $\text{m}^2$  Membranfläche erzeugten Permeates. Daher fällt hier die für eine Nennleistung veranschlagte Membranfläche geringer aus als bei getauchten Membransystemen. Der höhere spezifische Membranfluss wird über die Einstellung von höheren transmembranen Druckdifferenzen erzielt. Werden Druckmembrananlagen in vorhandenen, z.B. industriellen Anlagen integriert, in denen vorhandene Druckverhältnisse gegeben sind, können diese ausgenutzt werden. Ist das nicht der Fall, dürften die Energiekosten bei getauchten Membransystemen niedriger liegen. Druckbetriebene Membransysteme haben geringere rohwasserseitige Aufkonzentrationen und damit eine geringere Rohwasserausbeute. Sie haben auch keine offenen Wasserspiegel, da die Membranen in abgedichteten Druckrohren vorliegen. Das erschwert allerdings die Leckagesuche und bedingt einen erhöhten Aufwand für Wartung und Reparatur. Getauchte Membransysteme sind geeignet bei Rohwässern mit hohen Trübunggehalten und bedingen hier eine höhere Ausbeute gegenüber den Druckmembransystemen. Durch die rohwasserseitige Luftblasenüberströmung der Membranflächen können die Anlagen mit deutlich weniger Chemikalien betrieben werden. Die Anlagen sind stabiler im Betrieb (Eisele, 2003) und es entsteht weniger Aufwand für die verfahrenstechnische Peripherie. Die Leckagesuche ist durch die offenen Filtrationsbehälter einfacher, womit weniger Aufwand für Wartung und Reparatur entsteht. Sollten baulicherseits Becken vorhanden sein, können die Membranen hier einfach eingetaucht werden (Holy et al., 2003). Die Membranen sind robuster, allerdings muss in etwas mehr Membranfläche investiert werden. Durch die Einstellung eines geringeren spezifischen Membranflusses und dem damit verbundenen geringeren Transmembrandruck ist die Verblockungsgefahr der Membranen gegenüber den Druckmembranverfahren verringert.

Sollen Oberflächenwässer, die erheblichen Trübungsschwankungen unterliegen und damit verbunden oft erhöhte Feststofffrachten mit sich führen, zu Trinkwasser aufbereitet und weiterhin möglichst wenig Reinigungschemikalien verwendet werden, empfiehlt es sich, ein getauchtes System einzusetzen. In vielen Ländern, in denen Wasserknappheit herrscht, ist Oberflächenwasser die einzig verfügbare Ressource. Somit ist dieses Verfahren auch für die exportorientierte Forschung und Entwicklung von Bedeutung. Hier ist ein System mit einfacherem Engineering mit guter Zugänglichkeit der Behälter und Membranen, die zur Not auch manuell gereinigt werden können, im Vorteil.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen zur chemikalienfreien Membranreinigung mit Hilfe von Ultraschall ist ein getauchtes System vorteilhaft. Analog zu bekannten kommerziellen Ultraschallreinigungsverfahren können hier Ultraschalltauchschwinger direkt in den Flüssigkeitsbehälter eingehängt werden. Dadurch, dass die Druckunter-

schiede gering sind, ist es leichter, die Kavitationsschwelle zu überschreiten und damit die für eine effektive Reinigung angenommene erforderliche Kavitation zu erzeugen. Bei hohen Drücken ist Ultraschallreinigung oft nur schwer realisierbar, weil zum Überschreiten der Kavitationsschwelle dann mehr Energie benötigt wird und die Blasenimplosionen entsprechend heftiger ausfallen und damit leichter Schäden erzeugen können (Dezhkunov et al., 1997). Weiterhin wird eine Out/In-betriebene Membran von Vorteil sein, da die Kavitation von außen angreifen kann und diese damit die Schmutzablagerungen erreicht. Die Membran sollte als Flachmembran vorliegen, damit das Schallfeld sich gut zwischen den Membranen ausbreiten kann.

### **2.1.1 Membranverfahren, Einordnung der Ultrafiltration**

Bei der Filtration wässriger Lösungen werden je nach Größe der zurückgehaltenen Stoffe verschiedene Membranfiltrationsverfahren unterschieden. Diese sind: Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose, bzw. Reversosmose (RO), die klassische Meerwasserentsalzung. Ein Überblick über die Trennaufgaben der einzelnen Membranen wird in Abbildung 4 gegeben.

Mikrofiltration (MF): Die Mikrofiltration ist das nächst feinere Filtrationsverfahren nach der Siebung bzw. Filtration über verschiedene Siebmaterialien, die auch eine erstaunliche Feinheit aufweisen können. Bei Mikrofiltrationsmembranen handelt es sich um poröse Membranen mit einer Porenweite von etwa 1 µm bis 0,1 µm. Damit werden gröbere Partikel und Bakterien sicher zurückgehalten. Bei der Ausbildung von Deckschichten, kann auch von „deckschichtkontrollierter Filtration“ gesprochen werden, wodurch oftmals höhere Rückhalte, z.B. auch von Viren, beobachtet wurden. Das mag zusätzlich daran liegen, dass Viren meist an Partikel gebunden vorliegen. Die Mikrofiltration wird vielfach in der Abwassertechnik bei Membranbelebungsverfahren verwendet, wo sich die Membranen direkt in den Belebtschlammbecken befinden. In der weiteren Wasseraufbereitungstechnik wird sie auch gern als Voraufbereitungsstufe bei stärker verschmutzten Wässern oder zur Vorbehandlung in Kombination mit Nanofiltration oder Umkehrosmose eingesetzt.

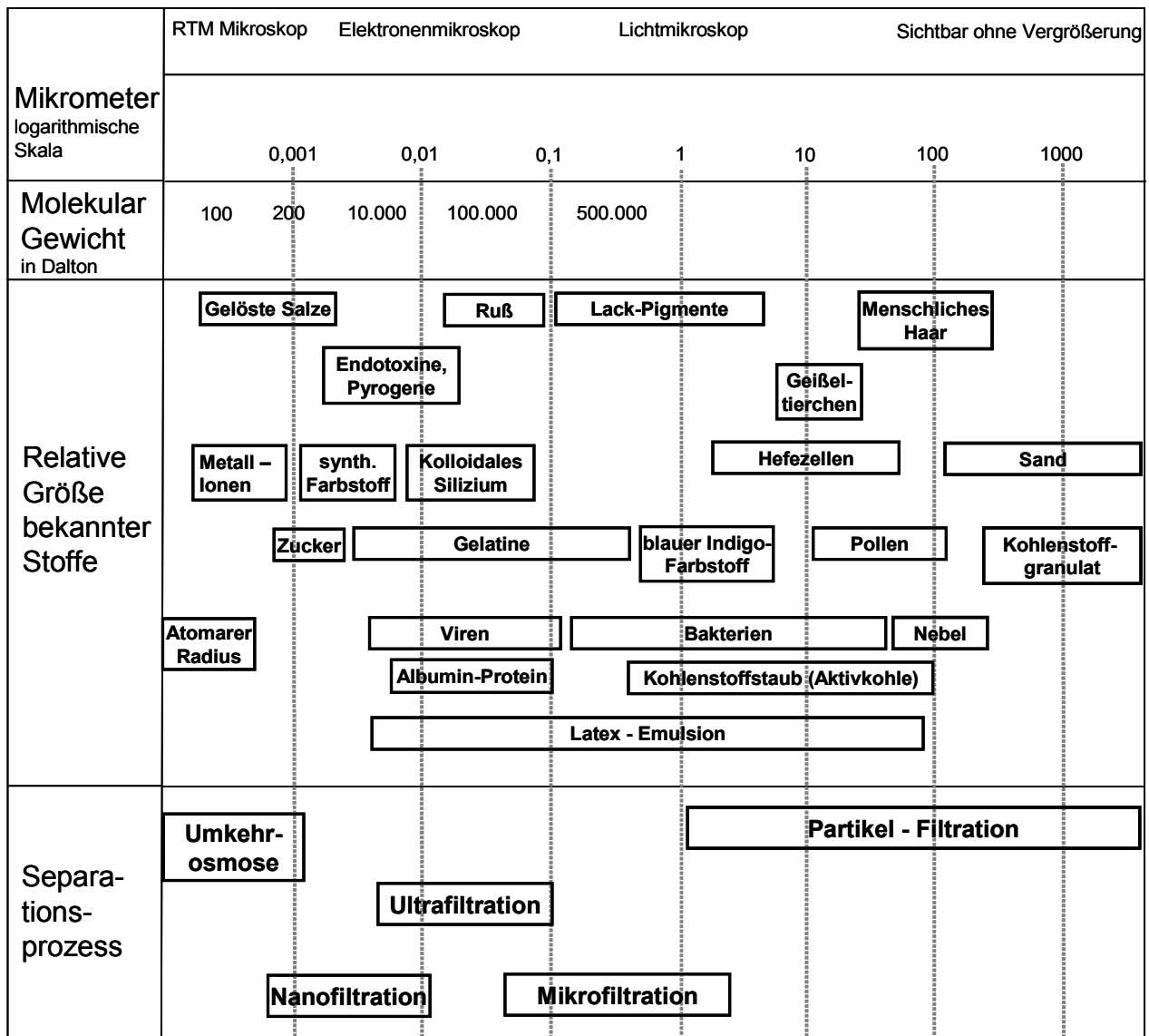


Abbildung 4: Größenordnung abtrennbarer Stoffe bei den verschiedenen Membranverfahren (nach Microdyn-Nadir)

Ultrafiltration (UF): Die Ultrafiltration ist ebenfalls ein Filtrationsverfahren über poröse Membranen. Die Porenweiten reichen von 0,1 µm bis 0,01 µm. Im Gegensatz zu den Mikrofiltrationsmembranen werden die Trenngrenzen in der Regel als molekulare Trenngrenze (MWCO, molecular weight cut off) in kiloDalton (kD) angegeben, wobei 1 kD 1000 g/mol entspricht. Der MWCO wird ermittelt, indem der Rückhalt von Stoffen bekannter Molmasse gemessen wird. Er hat den Wert der Molmasse eines Stoffes, der zu 90% zurückgehalten wird.

Mit diesem Verfahren lassen sich Kolloide, entsprechende Makromoleküle und Partikel, sowie Parasiten, Bakterien und in der Regel auch Viren (gerade, da sie meist an Partikel gebunden sind) zuverlässig entfernen. Die Ultrafiltration ist daher das meist eingesetzte Verfahren bei Trinkwasseraufbereitungstechnologien (Beispiel: von 83

Membrananlagen in Deutschland (bis Ende 2006 in Betrieb gegangen) sind drei MF-Anlagen, die übrigen sind UF-Anlagen. Verteilt auf die Anzahl der Anlagen werden hauptsächlich Quell- und Brunnenwässer aufbereitet (oft sind das Karstquellen). Wenige Anlagen (darunter auch die weitaus größte in Roetgen) bereiten Talsperrenwasser oder Uferfiltrat auf, vgl. Lipp, 2007).

Finden sich im Rohwasser allerdings spezielle Verschmutzungen, wie Pestizide, Arzneimittelrückstände oder z.B. Aromaten, kann entweder mit Nanofiltration (s. u.) oder aber alternativ mit der Kombination von Aktivkohle und Ultrafiltration gearbeitet werden. Damit sind z.B. nicht so hohe Drücke erforderlich, wie bei einer Nanofiltration, was sich energiesparend auswirken kann. Vor oder nach der Ultrafiltrationsstufe können je nach Rohwasserbeschaffenheit andere Aufbereitungsstufen eingesetzt werden. Dies sind z.B. Entsäuerung (chemisch oder physikalisch), Aufhärtung, Aktivkohlefiltration sowie Enteisenung und Entmanganung. Als Vorbehandlungsstufen gibt es zusätzlich die Möglichkeit der Flockungsmittelzugabe oder der Flockenfiltration, als Nachbehandlung sind Arsenentfernung und, bevor das Trinkwasser in das Trinkwassernetz eingespeist wird, die Dosierung von Korrosionsinhibitoren und Sicherheitsdesinfektionen mit Chlor oder Chlordioxid, die einer Wiederverkeimung des Wassers entgegenwirken.

Aktivkohlefilter können der Ultrafiltration vor- oder nachgeschaltet sein. Es gibt auch die Möglichkeit, Pulveraktivkohle vor der Ultrafiltration in das Rohwasser zu geben. Obwohl sich diese mit den gebundenen Partikeln auf der Membran als Deckschicht ablagert, haben Studien ergeben, dass dadurch die Filtrationseigenschaften der Membran nicht verschlechtert werden, sondern eher verbessert. Zusätzlich konnte ein höherer Rückhalt von Schadstoffen (z.B. DOC: gelöste, organische Stoffe; AOX: adsorbierbare, organisch gebundene Halogene) nachgewiesen werden (Seidel, 2002).

Ultrafiltrationsanlagen können auch z. T. mit sehr niedrigen Druckdifferenzen betrieben werden, die unterhalb von 200 mbar liegen.

Weitere Anwendungen finden sich in der Lebensmittelindustrie (z.B. Getränkeindustrie, Milchverarbeitung, Konzentration von Gelatine oder Hühnereiweiß) oder auch Pharmaindustrie (Reinigung von Antibiotika, Konzentration, Separieren und Reinigen von Impfstoffen und Enzymen), in der metallverarbeitenden Industrie (Standzeitverlängerung von Elektrotauchlackbädern, Konzentration von Öl/Wasser-Emulsionen, Aufarbeitung von Entfettungsbädern) und der Umwelttechnik (Sickerwasseraufbereitung, Vorreinigung für Umkehrosmoseanlagen, Konzentration von Wasserlack aus Spritzkabinenwasser). Dabei steht auch die Rückgewinnung von Stoffen oft im Mittelpunkt des Interesses.

Nanofiltration (NF): Die Nanofiltration hat Porenweiten von 1 bis 10 nm. Sie hält damit Moleküle einer Molmasse von 200 g/mol entsprechend einem Nanometer (daher

der Name) zurück. Die erforderlichen Drücke zur Aufrechterhaltung des Filtrationsprozesses liegen bei 3-30 bar. Die hohen Drücke werden dabei erforderlich, sobald die Trennleistung der Membran bestimmte osmotische Druckdifferenzen erzeugt. Zusätzlich dazu spielt die Ladung der Membran eine Rolle, besonders, wenn es um den Rückhalt von mehrfach geladenen Ionen geht. Durch Nanofiltrationsmembranen werden Makromoleküle und mehrfach geladene Ionen zurückgehalten. Somit können Nanofiltrationsmembranen Huminstoffe, Pestizide, synthetische Farbstoffe, aber auch endokrine Stoffe und hormonell wirksame Substanzen zurückhalten, was bei belasteten Wässern zur weitgehenden Reinigung notwendig werden kann. Durch den Rückhalt von mehrfach geladenen Ionen wird das Verfahren zur Trinkwasserenthärtung und zur Teilentsalzung eingesetzt (z.B. Sulfatentfernung) oder auch zur Entfernung von Schwermetallen. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Entfärbung von Wässern in der Textilindustrie.

Umkehrosmose (RO): Bei der Umkehrosmose (auch Reversosmose oder früher Hyperfiltration) werden anstelle von porösen Membranen sog. „dichte Membranen“ verwendet. Diese semipermeablen Membranen (bekannt aus der Pflanzenwelt) werden auch als Lösungs-Diffusionsmembranen bezeichnet. Der unterschiedliche Rückhalt verschiedener Ionen und niedermolekularer Verbindungen beruht auf den unterschiedlichen Löslichkeiten und Diffusionskonstanten der einzelnen Stoffe durch die Membranmatrix. Die Umkehrosmose ist das klassische Verfahren der Meerwasserentsalzung. Wird das Wasser vollentsalzt, so müssen für eine Verwendung als Trinkwasser wieder Mineralien zugegeben werden. Die Umkehrosmose ist sehr energieaufwändig, da für die Überschreitung des Konzentrationsgradienten (also entgegen dem osmotischen Druck) hohe Drücke angelegt werden müssen. Angewendete Drücke für die Vollentsalzung von Trinkwasser liegen bei 4-30 bar je nach Membran und Anlagenkonfiguration. Bei der Entsalzung von Meerwasser liegen sie bei 60 bis 80 bar. Da der osmotische Druck mit zunehmendem Konzentrationsunterschied steigt, kann die Druckdifferenz über stetige Konzentratabfuhr geringer gehalten werden, um damit die durch die Druckerhöhung erforderlichen Energiekosten zu minimieren.

Da die **Ultrafiltration** generell ein geeignetes Verfahren auch für die Aufbereitung von Oberflächenwasser zu Trinkwasserqualität ist, wird die für diese Arbeit betriebene Versuchsanlage mit Ultrafiltrationsmembranen ausgestattet.

Da hier ein Verfahren zur Reinigung der Membranen mit Hilfe von Ultraschall entwickelt werden soll, bietet sich auch deshalb die Ultrafiltration an, weil sie mit sehr niedrigen Druckdifferenzen betrieben werden kann. Bei hohen Drücken wird die Kavitationsschwelle oft erst unter hohen Energieeinträgen überschritten, wobei die Kavitati-

onsprozesse anschließend heftiger ausfallen. Damit besteht ein erhöhtes Potential für Kavitationserosion.

Bei den Verfahren der Nanofiltration und der Umkehrosmose ist solch ein Verfahren ebenfalls denkbar, jedoch müsste der Ultraschall zum Beispiel in druckfreien Phasen eingesetzt werden. Weiterhin sind entsprechende Membrangeometrien erforderlich, wie eine flache und von außen zugängliche Membranoberfläche, die Betriebsmöglichkeit im Out/In-Modus und eine Rückspülbarkeit des Membranmoduls.

### 2.1.2 Membranverfahren, Fouling

Der Begriff des Fouling hat sich für die Verschmutzung von Membranen durchgesetzt. Er bezeichnet die leistungsmindernde Verschmutzung von Membranen durch Ablagerung von Stoffen auf den Membranoberflächen aus der Wasserphase.

Fouling lässt sich je nach Beständigkeit auf der Membran (nach Melin und Rautenbach, 2004) in **reversibles Fouling** und **irreversibles Fouling** unterteilen. Bei reversiblen Fouling wird die Deckschicht bzw. die Verblockung durch mechanische Spülungen (Rückspülung, Luftblasenüberströmung) oder chemische Reinigungen entfernt, so dass der durch dieses Fouling entstandene Leistungsverlust wieder aufgehoben wird. Die durch irreversibles Fouling entstandenen Verblockungen sind mit einfachen, mechanischen oder chemischen Reinigungen nicht wieder zu entfernen. Dieser Leistungsverlust ist somit nicht wieder auszugleichen.

Fouling lässt sich weiterhin durch unterschiedliche Phänomene auf und in der Membran selbst differenzieren.

Die **irreversible Deckschicht** befindet sich auf der Membranoberfläche. Sie ist fest adsorbiert z.B. durch entgegengesetzt geladene Teilchen, die sich entweder allein oder als Brücke für andere Teilchen an der Membran angelagert haben. Die Schicht kann entsprechend kompaktiert und durch Einlagerungen und Ausfällungen stabilisiert sein.

Die **sterische Porenverblockung** entsteht, wenn die Partikelgröße dem Porendurchmesser entspricht. Dann bleibt der Partikel in der Porenöffnung stecken. Liegt z.B. ein hoher Filtrationsdruck an und ist der nachfolgende Rückspüldruck zu gering, wird der Partikel nicht wieder entfernt. Das passiert auch, wenn das Permeat aus der Rückspülung über wegsamere Poren entweicht, also dem geringeren Widerstand folgt.

Bei der **inneren Adsorption** handelt es sich um membrangängiges Material, welches sich in den Porengängen absetzt, so dass sich diese fortlaufend verengen, bis sie gar nicht mehr wegsam sind. Diese Teilchen sind kleiner als die Porenöffnung und gelangen daher durch diese hindurch, haben aber eine so große Affinität zum Membranmaterial, dass sie dort hängen bleiben.

Die Abb. 5 (aus Melin und Rautenbach, 2004) zeigt diese Foulingphänomene.

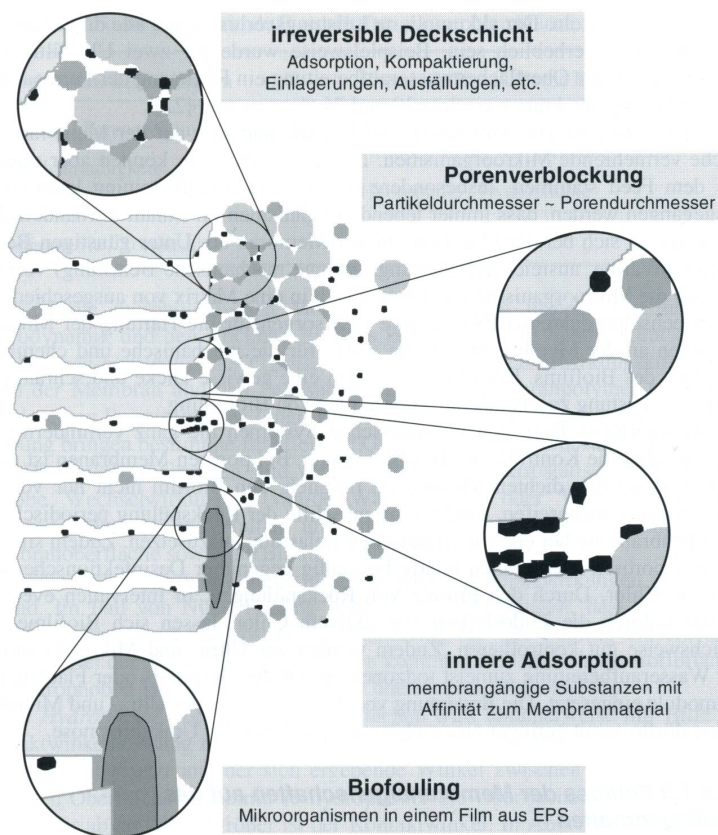


Abbildung. 5:  
Foulingmechanismen bei der Filtration über poröse Membranen (aus Melin und Rautenbach, 2004)

Es lassen sich verschiedene Arten des Fouling auf der Membran unterscheiden, je nach verursachender Ablagerung, auch Foulant genannt.

**Scaling:** auch mineralisches Fouling genannt, bezeichnet die Ablagerung anorganischer Stoffe in kristalliner Form. Scalingbildner sind z.B. Carbonate, Sulfate, Kieselsäure und bei entsprechender Trennleistung (z.B. Umkehrosmose) verschiedene Salze.

**Partikelfouling:** bezeichnet die Ablagerung von Partikeln sämtlicher Art. Diese können anorganischer Natur sein, z.B. Ton oder Sand oder auch zusammen gelagerte Kolloide und Flocken. Es können aber auch organische Substanzen, wie Huminstoffe, sein.

**Organisches Fouling:** bezeichnet die Ablagerung organischer Stoffe, wie z.B. von Öl, Fett, Proteinen oder Polysacchariden. Weiterhin gehören dazu die bei der Filtration von Oberflächenwässern in diesen enthaltenen, natürlichen organischen Substanzen (NOM = natural organic matter). Dazu zählen Bruchstücke von Pflanzen, Humin-



stoffe, Algen oder Mikroorganismen. Gelöstes organisches Material (vorwiegend Huminsäuren) wird auch als DOC bezeichnet (DOC = dissolved organic carbon).

**Anorganisches Fouling:** bezeichnet die Ablagerung anorganischer Stoffe auf der Membran, z.B. von Ton, Sand, Silikaten oder auch Metall-Hydroxidverbindungen von Fe, Al oder Mn.

**Biofouling:** bezeichnet die Anheftung und das Wachstum von Mikroorganismen auf Membranoberflächen. Diese Mikroorganismen leben von den durch das Rohwasser stetig antransportierten Nährstoffen. Sie betten sich in eine Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) ein. Dies bezeichnet man auch als Biofilmbildung. Das Problem bei den Membranverfahren ist die durch die gelartige Biofilmschicht verlagerte laminare Grenzschicht, wodurch der Wasserfluss die Membran nicht mehr direkt überströmt. Dadurch kommt der Permeatfluss oft fast zum Erliegen.

Bei der Filtration von realen Wässern, wie z.B. Oberflächenwasser, wird es in der Regel immer zu Kombinationen der verschiedenen Foulingarten kommen. Je nach Jahreszeit und Wasserinhaltsstoffen, aber auch nach Trennleistung der Membran, können dabei bestimmte Foulingarten dominieren.

Auch das **Membranmaterial** selbst hat entscheidende **foulingbestimmende Eigenschaften**. Diese lassen sich in **morphologische** und **chemisch-physikalische** Eigenschaften unterteilen (nach Melin und Rautenbach, 2004).

Zu den morphologischen Eigenschaften zählen **Struktureigenschaften**, wie die **Oberflächenrauigkeit** und die **Oberflächenporosität**, weiterhin die **Porengröße**, die **Porengrößenverteilung** und **-geometrie**. Bei rauen Membranoberflächen und Cross-Flow-Betrieb wird die laminare Grenzschicht dicker, wodurch sich die Anlagerung von Stoffen begünstigt. Bei geringer Oberflächenporosität werden die Stoffe bevorzugt in der Nähe von Porenmündungen abgelegt, was sich verblockungsfördernd auswirkt. Die Porengrößenverteilung, sowie deren Geometrie kann sich je nach Zusammensetzung der im Rohwasser enthaltenen Substanzen fördernd auf Foulingerscheinungen auswirken oder nicht. Im negativen Fall kann es zu innerer Adsorption oder sterischer Porenverblockung kommen. Neben dem Fouling nehmen die morphologischen Eigenschaften der Membranen Einfluss auf Hydrodynamik und Rückhalt.

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Membran sind durch das verwendete Membranpolymer und etwaige **Oberflächenmodifikationen** gegeben. Diese sind verantwortlich für **elektrostatische Wechselwirkungen (Dipol-Kräfte)**, **hydrophobe Wechselwirkungen (Van-der-Waals Kräfte)** oder **Wasserstoffbrückenbildung** zwischen Membran und Foulant. Sie entscheiden somit, ob eine Anlagerung an der

Membranoberfläche stattfindet und wenn ja, über dessen Bindungsstärke. Beispielsweise sind bei der Anlagerung von Fetten hydrophobe Wechselwirkungen ausschlaggebend, beim sog. NOM-Fouling hydrophobe Wechselwirkungen sowie elektrostatische Abstoßung, bei der Adhäsion von Biofilmen hydrophobe Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbildung.

Da die meisten Polymermembranmaterialien stark hydrophob sind und somit schmutzanziehend und wasserabstoßend wären, werden die Membranen hydrophilisiert. Dabei werden die Oberflächen der Membranen modifiziert, was z.B. durch Oxidation von funktionellen Gruppen geschehen kann. Die Polymermembranen haben dadurch bei neutralen pH-Werten negative Oberflächenladungen. Dadurch wird eine möglichst große Abstoßung der foulingbildenden Substanzen erreicht, da die meisten natürlichen Substanzen und Kolloide in neutraler Umgebung negative Ladungen aufweisen.

Diese Eigenschaft der Membran ist besonders wichtig, um eine leichte Entfernbarkeit der beim Filtrationsprozess entstehenden Deckschichten zu gewährleisten. Sie ist generell die Voraussetzung für die Vereinfachung von Reinigungsprozessen der Membranoberflächen.

Die **Hydrophobie** von Festkörperoberflächen wird üblicherweise mit Hilfe der **Kontaktwinkelmessung** bestimmt. Dabei wird ein Tropfen Wasser auf der ebenen Oberfläche abgesetzt und der sich ergebende Winkel zwischen Tropfen und der benetzten Oberfläche bestimmt. Je hydrophober die Oberfläche ist, desto mehr perlt das Wasser ab und desto größer ist der **Kontaktwinkel** ( $\Theta$  in  $^\circ$ ) (Melin und Rautenbach, 2004). Entsprechend ist der Kontaktwinkel kleiner, je hydrophiler die Oberfläche ist.

Die **Ladung** der Membranoberfläche wird über das **Zeta-Potential** ( $\zeta$  in mV) angegeben. Dabei ist die Ladung einer Membranoberfläche abhängig vom pH-Wert der Umgebungslösung.

Zur Vermeidung von Fouling gehört neben der Wahl des für die Filtrationslösung geeigneten Membranmaterials auch die Wahl des passenden Membranmoduls sowie ein geeigneter Betriebsmodus mit optimaler Einstellung der Betriebsparameter (siehe auch Kap. 2.1.4). Die Auslegung der Anlage erfolgt nach der Qualität des zu filtrierenden Wassers bzw. der zu filtrierenden Lösung.

### 2.1.3 Membranverfahren, Materialien und Module

Bei den **Membranwerkstoffen** werden organische (d.h. polymere) und anorganische Membranen (z.B. aus Keramik oder Metall) unterschieden.

Eine Membran besteht dabei aus trennaktiver Schicht und Stützschrift. Bestehen diese beiden Schichten aus unterschiedlichen Materialien spricht man von Kompositmembranen.

Die verbreitetsten **Polymermembranmaterialien** sind Polyethersulfon (PES), Polyacrylnitril (PAN), Polyvinylidendifluorid (PVDF), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polysulfon (PS) als synthetische Membranen, es sind aber auch modifizierte Naturprodukte, wie Celluloseacetat oder Cellulosenitrat auf dem Markt. Weitere Polymermaterialien, die über ihre unterschiedlichen Struktureigenschaften durch die chemischen Bindungen (Konstitution, Konfiguration, Konformation → Polymerchemie) das Verhalten während der Filtration bestimmen, sind auf dem Markt bzw. in der Erforschung. Die Struktureigenschaften des Polymers bewirken die thermische, chemische und mechanische Beständigkeit, sowie durch den inneren Aufbau über die Permeabilität für unterschiedliche Komponenten, aber auch die Anfälligkeit für Porenverblockungen durch verschiedene Wasserinhaltsstoffe.

Bei **organischen Kompositmembranen** sind trennaktive Schicht und Stützschrift aus zwei unterschiedlichen organischen Werkstoffen gefertigt, damit sie getrennt für die jeweiligen Anforderungen optimiert werden können.

**Anorganische Membranen** werden aus Keramik (spezielle Metalloxide und Zeolithe), Kohlenstoff, verschiedenen Gläsern (Borosilikate), Edelmetallen, Legierungen oder Edelstahl gefertigt. Gegenüber den Polymermembranen haben diese Vorteile, wie z.B. eine höhere chemische-, mechanische-, und Temperaturbeständigkeit, längere Standzeiten durch geringere Membranalterung und Stabilität bei höheren Drücken. Nachteile sind teurere Fertigungskosten und die fehlende Flexibilität der Membranen.

Bei den **anorganischen Kompositmembranen** gibt es die Entwicklung einer flexiblen keramischen Flachmembran („Creafilter“ von Creavis, Degussa). Das Trägermaterial besteht aus flexiblem Glas- oder Metallgewebe, auf das keramische Partikel verschiedener Größen aufgebracht werden und damit zu verschiedenen gewünschten Porengrößen führen. Diese Membran kann daher für sämtliche Anwendungsprozesse sehr interessant sein.

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die Membranwerkstoffe und ihre Eigenschaften. Gelb unterlegt ist dabei die in der Versuchsanlage dieser Arbeit zum Einsatz gekommene Membran.

Tabelle 1: Membranwerkstoffe und ihre Eigenschaften

Membranwerkstoffe	Eigenschaften
organisch (z.B. Polymermembran)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- günstige und rationelle Fertigung</li> <li>- Flexibilität</li> <li>- Strukturen durch verschiedene Struktureigenschaften an verschiedenste Anforderungen anpassbar</li> <li>- geringere chemische und thermische Beständigkeit</li> <li>- geringere Standzeiten</li> </ul>
anorganisch (z.B. Keramikmembran)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- chemische und thermische Beständigkeit</li> <li>- geringere Membranalterung, dadurch höhere Standzeiten</li> <li>- Stabilität bei hohen Drücken</li> <li>- nicht flexibel</li> <li>- teure Fertigungskosten</li> </ul>
organische Kompositmembran	wie organische Membran, aber trennaktive Schicht und Stützschiicht können für die jeweilige Aufgabe getrennt optimiert werden
anorganische Kompositmembran	wie anorganische Membran, aber: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilität durch Trägermaterial aus z.B. Glas- oder Metallgewebe (Creavis)</li> <li>- gesonderte Optimierungen möglich</li> </ul>

Um eine betreibbare Anordnung zu erhalten, werden die Membranwerkstoffe zu sogenannten **Membranmodulen** verarbeitet. Ein solches Modul muss dicht sein, d.h. so, dass die Rohwasserseite sicher von der Permeatseite abgetrennt ist, bzw., dass der Stoffdurchgang nur durch die Membran in ihrer filtrierenden Eigenschaft hindurch erfolgen kann. Weist das Modul Undichtigkeiten auf, ist es schadhaft und damit die Membranintegrität nicht gewährleistet.

Die Anforderungen an ein Membranmodul (nach Melin und Rautenbach, 2004) sind vielschichtig:

- gleichmäßige Überströmung der Membran
- mechanische, chemische und thermische Stabilität,
- hohe Packungsdichte,
- hohe Feststoffbeladbarkeit,
- kostengünstige Fertigung,
- gute Reinigungsmöglichkeit,
- kostengünstiger Membranwechsel, geringe Druckverluste, geringe Polarisationsseffekte.

Eine hohe Packungsdichte steht natürlich in Konflikt mit einer guten Modulspülbarkeit bzw. einer geringen Verblockungsneigung und einem geringen Chemikalienver-

brauch (siehe Tab. 2). Somit muss für jeden Anwendungsfall nicht nur der passende Membranwerkstoff ausgewählt werden, sondern auch ein den Anforderungen entsprechendes Membranmodul.

In der Verarbeitung des Membranmaterials werden Flachmembranen und Schlauchmembranen unterschieden. Tabelle 2 gibt dazu einen Überblick und zeigt welche Membranmodule verfügbar sind und ob sie als Druckmodul oder getauchtes Modul eingesetzt werden. Die Tabelle gibt ebenfalls an, welche Module aus organischen oder anorganischen Membranwerkstoffen gefertigt werden. Weitere Eigenschaften sind in der rechten Tabellenspalte aufgeführt. Gelb unterlegt ist das für die Versuchsanlage dieser Arbeit ausgewählte Membranmodul.

Tabelle 2: Membranmodule im Überblick

Schlauchmembranen	Rohrmodul, 5-25 mm	Druckmodul, org., anorg.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunahme der Packungsdichte</li> <li>- Zunahme der Verblockungsneigung</li> <li>- Abnahme der Reinigungsmöglichkeit</li> <li>- vermehrter Chemikalieneinsatz</li> <li>- Einsatz weniger verschmutzten Wassers</li> </ul>
	Kapillarmodul, 0,5-5 mm	Druck-, getauchtes Modul, org.	
	Hohlfasermodule, 80-500 µm	Druckmodul, org.	
Flachmembranen	Plattenmodul	getauchtes Modul, org., anorg.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunahme der Packungsdichte</li> <li>- Zunahme der Verblockungsneigung</li> <li>- Abnahme der Reinigungsmöglichkeit</li> <li>- vermehrter Chemikalieneinsatz</li> <li>- Einsatz weniger verschmutzten Wassers</li> </ul>
	Taschenmodul	getauchtes Modul, org.	
	Kissenmodul	Druckmodul, org.	
	Wickelmodul	Druckmodul, org.	

Bei den Flachmembranen ist zu ergänzen, dass Plattenmodule innenliegend eine Platte zur Membranabstützung eingearbeitet haben. Die Platten werden zu Stapeln zusammengefasst und sind nicht rückspülbar. Sie werden in der Regel durch äußerliche Überströmung (auch mit Luftblasen) abgereinigt. Damit unterstützen die am Fuß der Module eingesetzten Belüftungselemente auch die Abreinigung der Membranen. Auch das Kissenmodul hat innenliegend eine Platte. Die Kissenmodule sind jedoch kleiner als die Platten und rückspülbar, dazu gibt es sie gegenüber den getauchten Plattenmembranen nur im Druckgehäuse.

Weiterhin gibt es Module mit sogenannten Membrantaschen, die ebenfalls rückspülbar sind und im Prinzip wie Membrankissen arbeiten, jedoch keine innenliegende Platte aufweisen. Stattdessen wird ein Vlies verwendet, welches durch die Drainagewirkung das Permeat ableitet. Diese Membranmodule werden als getauchte Module

eingesetzt und haben wie die Plattenmodule Belüftungselemente am Fuß des Moduls. Damit sind sie für verschiedenste Verfahrenskombinationen einsetzbar. Da es sämtliche Möglichkeiten bietet und insbesondere eine rückspülbare, getauchte Flachmembran ist, wird dieses Membranmodul für den Einsatz in der Versuchsanlage eingesetzt (Tabelle 2, gelb unterlegt).

Das Wickelmodul besteht aus rechteckigen Membrantaschen, bei denen ein sogenannter Spacer zur Permeatabfuhr eingearbeitet ist. Die Membrantaschen sind an drei Seiten geschlossen, wobei sich an der offenen Seite das Permeatsammelrohr anschließt. Sie Membrantaschen sind um das Permeatsammelrohr in der Mitte gewickelt, daher der Name des Moduls. Es hat eine sehr große Packungsdichte und wird ausschließlich im Druckverfahren betrieben, insbesondere auch bei der Umkehrosmose.

Das Wickelmodul und das Kissenmodul scheiden zum Einsatz in der Versuchsanlage aus, da sie nur im Druckgehäuse betrieben werden können. Das Plattenmodul scheidet ebenfalls aus, da es nicht rückspülbar ist.

Ob eine Ultraschallreinigung auch mit einer getauchten Schlauchmembran möglich wäre, bleibt zu klären, ist aber nicht Forschungsgegenstand dieser Arbeit.

Die keramischen Membranen werden als Multikanalrohrmodule oder als Flachmembranmodule verbaut. Sie haben den Vorteil, dass sie durch ihre Stabilität mit hohen Drücken rückgespült oder gespült (forward flush) werden können. Ihre Oberfläche ist kratzresistent, so dass die Membranen auch mit z.B. scharfem Wasserstrahl manuell gereinigt werden können.

Ob auch die keramischen Membranen, insbesondere die getauchten Flachmembranen mit Hilfe von Ultraschall gereinigt werden können, ist eine spannende Frage, aber ebenfalls nicht Forschungsgegenstand dieser Arbeit.

Bei größeren Anlagen können mehrere Module **in Reihe** hintereinander oder **parallel** geschaltet werden. Bei der Reihenschaltung erhält das erste Modul das originalverschmutzte Rohwasser, das zweite oder die weiteren Module schon gereinigtes Wasser. Das kann bei stärker verschmutzten Flüssigkeiten sinnvoll sein oder aber, wenn es um die Rückgewinnung von Stoffen geht und die Membranmodule unterschiedliche Trenngrenzen besitzen. Jedes Modul kann dabei bestimmte Partikel-Komponenten zurückhalten.

## 2.1.4 Anlagenparameter

Für den Betrieb der Versuchsanlage sowie die Darstellung und den Vergleich der Ergebnisse gelten bestimmte Parameter und Größen sowie Verfahrensabfolgen:

### **Spezifischer Membranfluss $Q_s$ in $[L/(m^2 \cdot h)]$ :**

Menge an Rohwasser, die die Membran je Quadratmeter und in der Stunde als Permeat hindurchlässt. Dieser Wert ist abhängig von der Qualität des Rohwassers und dem Verblockungsgrad der Membran. Bei Rohwasser geringer Trübung ergibt sich ein höherer spezifischer Membranfluss bei gleicher transmembraner Druckdifferenz.

### **Rohwasserausbeute $\eta$ in [%]:**

Anteil des Rohwassers, der als Netto-Permeatmenge gewonnen wird. Die Rohwasserausbeute ist also die Rohwassermenge abzüglich des Retentats (Abwasserstrom) und des für die Rückspülung benötigten Permeats, als Prozentsatz der Rohwassermenge.

### **Trennleistung $TL$ in [kD]:**

gibt an, welche Partikelgrößen von der Membran zurückgehalten werden können. Sie wird auch als molecular weight cut off [MWCO] bezeichnet. Ein Kilodalton [kD] entspricht dabei 1000 g/mol. Wieviel Prozent eines Stoffes dabei zurückgehalten werden können, gibt die Rückhalteleistung an.

### **Rückhalteleistung $RL$ in [%]:**

wird oft für bestimmte Indikatorstoffe angegeben und ist das Maß, wie vollständig die Membran diese Partikel zurückhalten kann. Ist die Trübung des Permeates besonders gering bzw. ist es besonders partikelarm, ist die Rückhalteleistung der Membran umso besser. Sie ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit einer Membran in qualitativer Hinsicht.

### **Permeabilität $Pe$ in $[L/(m^2 \cdot h \cdot bar)]$ :**

bezeichnet die Durchlässigkeit der Membran. Sie ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Membran in quantitativer Hinsicht. Ist die Permeabilität hoch, kann in der Regel auch ein höherer spezifischer Membranfluss eingestellt werden. Die Permeabilität ist außerdem temperaturabhängig, da sich die Viskosität des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur verändert. Dabei erhöht sich die Viskosität des Wassers mit abnehmender Temperatur. Pro °C kann überschlagsmäßig ein Wert von 3% Temperaturkorrektur angenommen werden. Zur Vergleichbarkeit der Permeabilitätswerte wird die Temperatur generell auf 20°C normiert. Gemäß der Rohwassertemperatur

werden die Werte somit nach oben oder nach unten korrigiert. Entsprechend wurden die Werte der Versuchsanlage in dieser Arbeit normiert.

Die Permeabilität  $Pe$  [ $L/m^2 \cdot h \cdot bar$ ] ist definiert durch:

$$Pe = Q / (A \cdot TMP)$$

mit

$A$  = Membranoberfläche [ $m^2$ ]

$Q$  = Fluss durch die Membran [ $L/h$ ]

$TMP$  = transmembrane Druckdifferenz (transmembrane pressure) [ $bar$ ].

Für einen Temperaturbereich von 5-25°C gilt (nach Langbein) folgende Formel zur Normierung der Permeabilität auf 20°C:

$$Pe_{20} = 1,71 \cdot e^{(-0,026 \cdot T)} \cdot Pe$$

mit

$T$  = Temperatur [ $^{\circ}C$ ]

$Pe$  = Permeabilität [ $L/(m^2 \cdot h \cdot bar)$ ]

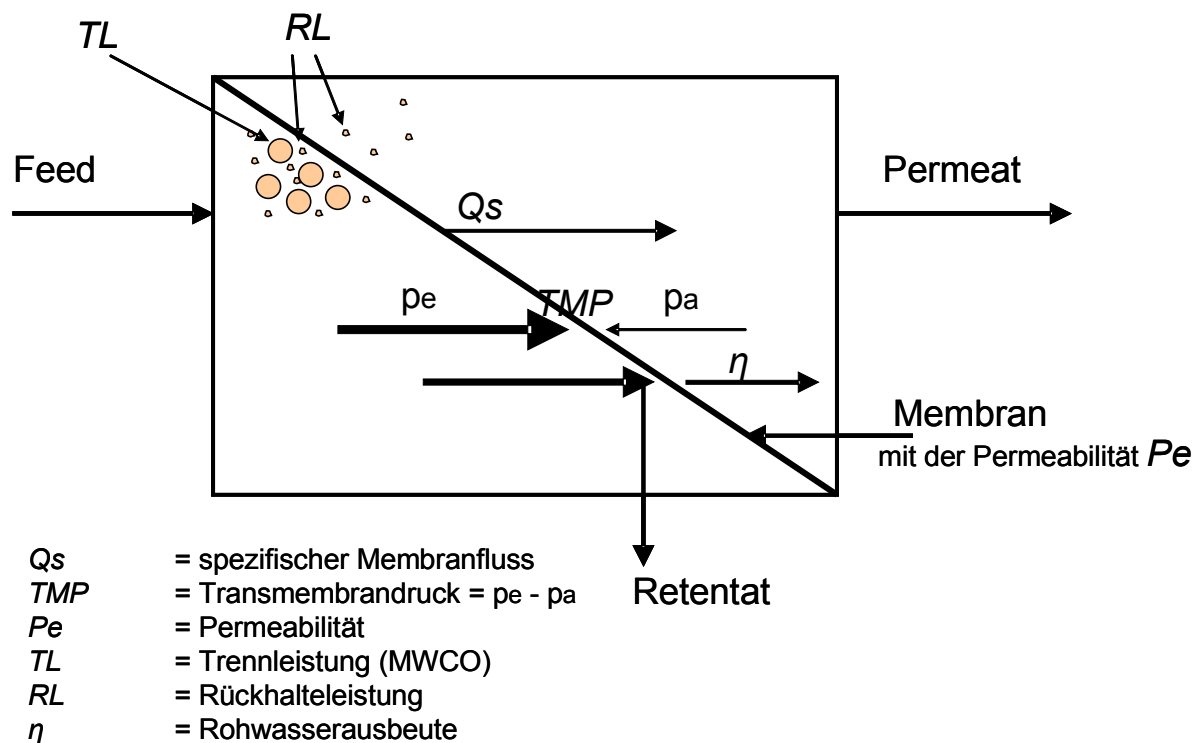


Abbildung 6: Begriffe des Membranprozesses



Um die Membrananlage leistungsfähig betreiben zu können, müssen bestimmte Verfahrensschritte erfolgen (Filtrationszyklus).

Der **Filtrationszyklus** der rückspülbaren Module gliedert sich in eine Filtrationsphase, eine Umschaltphase zur Rückspülung, eine Rückspülphase, eine Umschaltphase zur Filtration und die erneute Filtrationsphase (Abb. 7). Wie lang die Filtrationsphase ist, die die Phase der aktiven Permeatproduktion darstellt, hängt u. a. von der Qualität des Rohwassers ab. Bei relativ sauberem Rohwasser können die Filtrationsphasen länger sein.

Zur Orientierung:

Bei den Ultrafiltrationsanlagen zur Trinkwasseraufbereitung in Deutschland: Filterlaufzeiten von 60 min überwiegen, jedoch sind auch Filterlaufzeiten von 30, 45 oder 120 min häufig anzutreffen. Die Dauer der Rückspülphase liegt verbreitet zwischen 30 und 60 sec. Die Trübungen liegen meist unter 10 FNU, selten treten hohe Trübungsspitzen (z.B. im Karst nach Starkregenereignissen) auf.

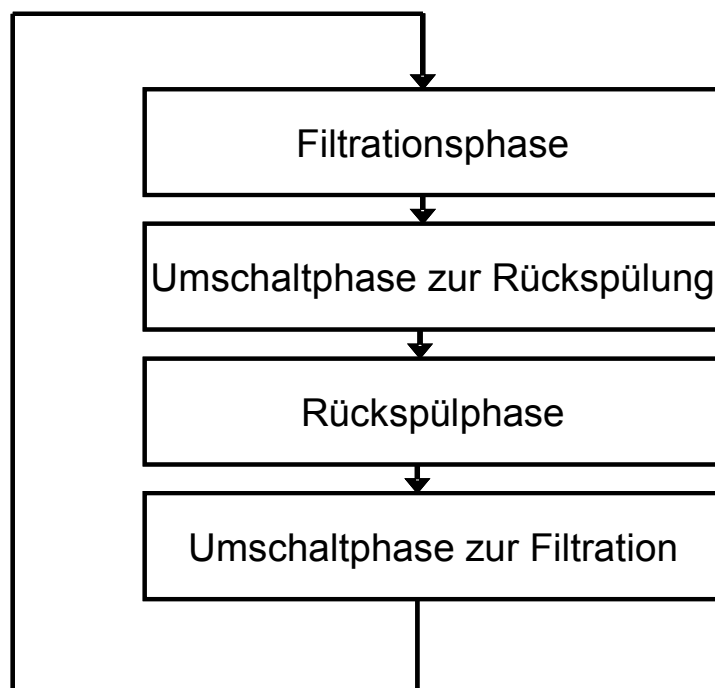


Abbildung 7: Schema der Abfolge des Filtrationszyklus.

## 2.2 Grundlagen der Ultraschalltechnologie

Schallwellen sind, im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen (z.B. Licht), mechanische Wellen, d.h. sie sind an Materie als Übertragungsmedium gebunden. Elektromagnetische Wellen können sich auch im Vakuum ausbreiten, Schallwellen indes nicht. Das die Schallwellen übertragende Medium kann dabei gasförmig (z.B. Luft), flüssig (z.B. Wasser) oder fest (z.B. Holz) sein.

Eine emittierte Schallwelle verdichtet Materie bzw. zieht sie auseinander, so dass Überdruck- und Unterdruckbereiche gegenüber dem Ruhedruck ohne Schall entstehen.

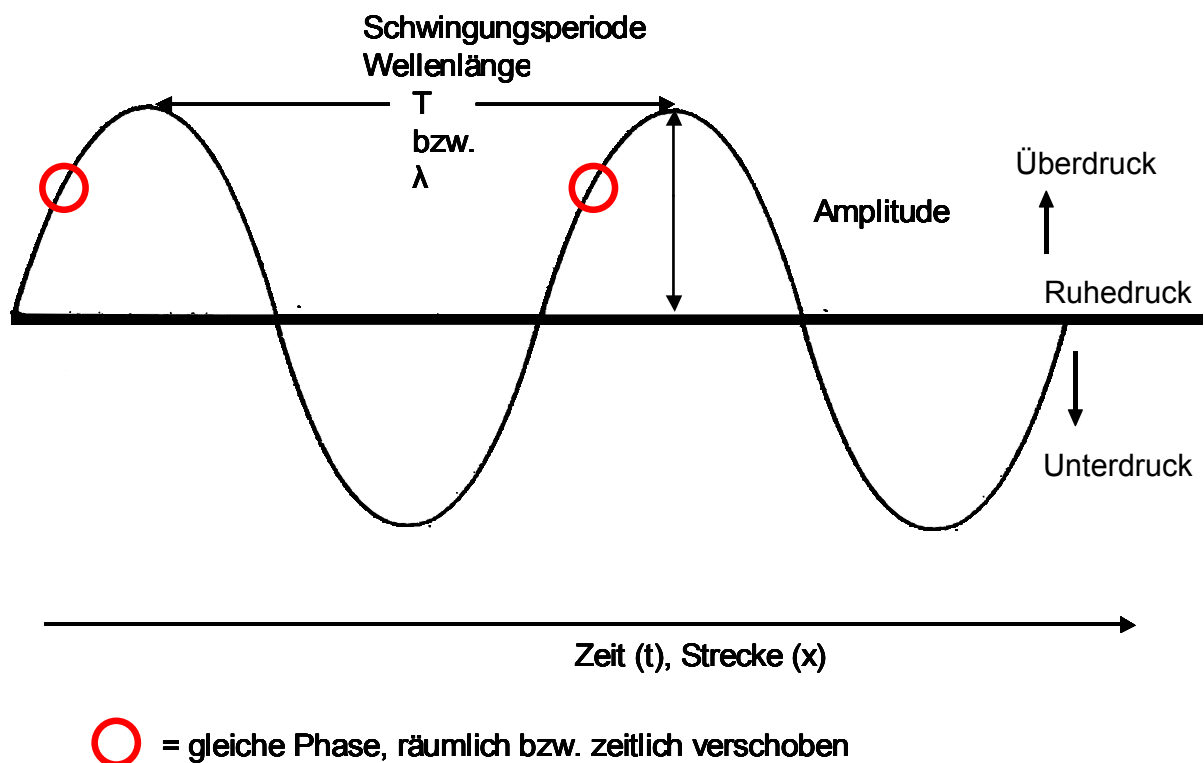


Abbildung 8: Begriffe aus der Wellenlehre, dargestellt anhand einer harmonischen Schwingung

Zunächst werden einige elementare Begriffe aus der Wellenlehre vorgestellt. Betrachtet wird eine **harmonische Welle**. Sie besteht aus einer Folge ungedämpfter, sich gleichmäßig ausbreitender Schwingungen in Form von Sinusschwingungen. Abbildung 8 zeigt exemplarisch eine dieser Schwingungen. Die Welle ist in ihrer Ausbreitung räumlich sowie zeitlich zu betrachten. Eine **Phase** ist der Schwingungszustand einer Welle an einer bestimmten Stelle und zu einem bestimmten Zeitpunkt. Im zeitlichen Abstand von einer **Schwingungsperiode** ( $T$ ) wird dieselbe Phase erreicht. Die **Wellenlänge**, mit Lambda ( $\lambda$ ) bezeichnet, ist der kleinste Abstand zweier Punkte

gleicher Phase bei einer Welle. Sie ist damit die räumliche Entsprechung der Schwingungsperiode. Die **Amplitude** ist die maximale Auslenkung der Schwingung.

Wie aus dem markierten Kästchen der folgenden Zeichnung (Abb. 9) zu entnehmen ist, ist für diese Arbeit, bei der es um Ultraschallreinigung geht, das Gebiet des Ultraschalls von besonderem Interesse.

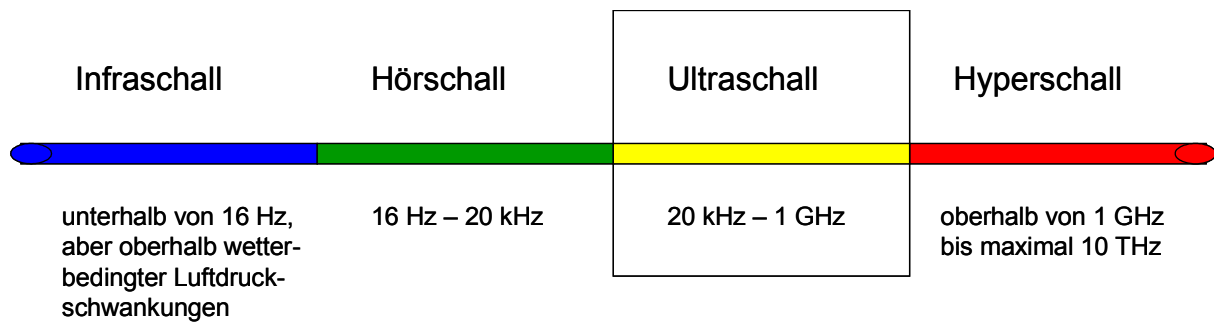


Abbildung 9: „Schallbereiche“

Der Bereich der Schallwellen ist unterteilt in:

Der Schall wird in **Frequenzen** ( $f=1/T$ ) eingeteilt, die in der Einheit Hertz [Hz] angegeben werden. Dabei ist ein Hertz eine Schwingung pro Sekunde (1/s).

Weitere Schallfeldgrößen dienen der Beschreibung des Schallfeldes:

Der **Schalldruck** ( $p$  in bar =  $10^5$  Pa, wobei 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>) bezeichnet die Druckschwankungen in einem Medium gegenüber dem Ruhedruck. Dabei befinden sich im Medium Phasen des Überdrucks sowie des Unterdrucks.

**Die Schallintensität** ( $I_s$ ) wird in Watt (1W = 1 kg•m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) pro Fläche [W/m<sup>2</sup>] angegeben, in praktischen Fällen meist [W/cm<sup>2</sup>], und ist:

$$I_s = p \cdot v, \quad [W/m^2 = N/m^2 \cdot m/s]$$

wobei

$p$  = Schalldruck [N/m<sup>2</sup>]

$v$  = Schallschnelle [m/s]

Die Schallschnelle bezeichnet die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilchenauslenkung vollzieht, ist also ein Weg pro Zeiteinheit [m/s].

Die **Schalleistung** ( $P$ ) ist die von einer Schallquelle abgegebene Schallenergie pro Zeiteinheit und wird in Watt [W] angegeben:

$$P = I_s \cdot A_s, \quad [W = W/m^2 \cdot m^2]$$

wobei

$A_s$  = Fläche des eingestrahlt Schalls [ $m^2$ ]

$I_s$  = Schallintensität [ $W/m^2$ ]

Die in einem Schallfeld enthaltene **Schallenergie** wird in Joule ( $1J = 1Ws$  oder  $1Nm$ ) angegeben. Da die Schallschwingungen mit Wechselbewegungen von Teilchen einhergehen, transportieren diese kinetische Energie. Die Schallenergie eines Schallfeldes lässt sich als Summe aus kinetischer und potentieller Energie berechnen. Dabei ist die **Schallenergiedichte** die Schallenergie bezogen auf die Volumeneinheit [ $J/m^3$ ].

Der **Schallfluss** ( $q$ ) (in  $m^3/s$ ) ist das Produkt aus Schallschnelle ( $v$ ) und der Querschnittsfläche ( $A_s$ ) senkrecht zur Schwingungsrichtung. Wenn die Fläche überall gleichphasig durchströmt wird, gilt:

$$q = v \cdot A_s, \quad [m^3/s = m/s \cdot m^2]$$

wobei

$v$  = Schallschnelle [ $m/s$ ]

$A_s$  = Fläche des eingestrahlt Schalls [ $m^2$ ]

Die **Schallimpedanz** ( $Z$ ) definiert das Verhältnis von Schalldruck zu Schallschnelle und wird in der Einheit [ $Ns/m^3$ ] angegeben.

$$Z = p/v = \rho \cdot c, \quad [Ns/m^3 = kg/m^3 \cdot m/s]$$

wobei

$\rho$  = Dichte des Mediums [ $kg/m^3$ ]

$c$  = Schallgeschwindigkeit [ $m/s$ ]

Die Schallimpedanz bezeichnet also den Widerstand, der der Schallausbreitung entgegensteht.

Für die **Schallgeschwindigkeit** ( $c$ ) gilt die Formel:

$$c = \lambda \cdot f, \quad [\text{m/s} = \text{m} \cdot 1/\text{s}]$$

wobei

$\lambda$  = Wellenlänge [m]

$f$  = Frequenz [1/s]

Die Impedanz von Wasser ist rund 3000 mal höher als die von Luft. Daher wird aus der Luft kommender Schall an der Wasseroberfläche reflektiert. Die Schallgeschwindigkeit in Wasser ist, bedingt durch die sehr viel höhere Dichte ( $998 \text{ kg/m}^3$ ), mit  $1483 \text{ m/s}$  deutlich höher als in Luft (Dichte:  $1,293 \text{ kg/m}^3$ ) mit  $331 \text{ m/s}$ .

Die Impedanzen der Stoffe werden dabei auch als sog. **Schallkennimpedanz** angegeben als Produkt aus Dichte des Stoffes und Schallgeschwindigkeit innerhalb dieses Stoffes. Dieser Wert gibt an, ob ein Stoff in einem Medium **schallhart** oder **schallweich** reagiert. Diese Eigenschaft versteht sich grundsätzlich im Vergleich des Stoffes gegenüber dem Medium. Im für die Ultraschallreinigung üblichen Übertragungsmedium Wasser reagiert ein Stoff mit einer niedrigeren Schallkennimpedanz schallweich und ein Stoff mit höherer schallhart.

Die Werte können sich verändern, bei z.B. in Wasser gelösten Stoffen oder gar einem anderen Übertragungsmedium oder auch bei starker Porosität des Filtermediums, bei dem sich die Poren mit Wasser füllen und zu einer Inhomogenität des Stoffes führen und damit seine Schallkennimpedanz verändern.

Bei der Ultraschallreinigung wird der Schall über eine Flüssigkeit (meist Wasser) übertragen und weitergeleitet. In Flüssigkeiten breitet sich der Schall in Form von Longitudinalwellen (Druck- und Dichteschwankungen) aus, bei denen die Richtung der Teilchenbewegung und der Schallausbreitung übereinstimmen. Für die Schallübertragungseigenschaften von Flüssigkeiten sind Oberflächenspannung (bei Blasen in der Flüssigkeit) und Viskosität (z.B. für die Dämpfung des Schalls) von Bedeutung.

### 2.2.1 Wirkung des Ultraschalls und Einsatz in der Reinigung

Eine für Ultraschall höherer Intensität in Flüssigkeiten typische Erscheinung ist die **Kavitation**. Unter Kavitation (von lat. „cavus“ für hohl) versteht man die Bildung von Hohlräumen in einer Flüssigkeit durch die Einwirkung eines Unterdrucks. Durch den

eingeleiteten Ultraschall entstehen Bereiche des Unterdrucks, wodurch eine Zugspannung die Flüssigkeit an Störstellen (sog. Kavitationskeimen) aufreißt (Kuttruff, 1988). Diese **Kavitationskeime** können mikroskopisch kleine Gasblasen in der Flüssigkeit sein, aber auch kleine Gasblasen an Ecken, Kanten und in mikroskopisch kleinen Spalten des begrenzenden Behälters, dort wo die Flüssigkeit die feste Grenzfläche nicht vollständig benetzt. Dies gilt auch für die Anlagerung kleinster Bläschen an im Wasser befindlichen Schwebeteilchen. Enthielte die Flüssigkeit keine Kavitationskeime, wäre ein Vielfaches an Energieeintrag notwendig, um in der Flüssigkeit Kavitation zu erzeugen (Wechseldruckamplitude von etwa 300 bar). Der maximal gemessene Wert für hoch gereinigtes Wasser liegt bei 277 bar Unterdruck und 10°C (Briggs, 1950). Der theoretisch benötigte Unterdruck zum Aufreißen von hochreinem, homogenen Wasser beträgt etwa 1400 bar bei 25 °C (Fisher, 1948), (siehe auch Mørch, 2007). Dieser Wert konnte sogar bei ultrareinen Wassereinschlüssen in Quarz, die isochorisch (gleichvolumig) abgekühlt wurden, experimentell belegt werden (Zheng et al., 1991).

Bei realem Wasser tritt Kavitation schon bei Wechseldruckamplituden von unter einem Bar auf. Damit Kavitation entsteht, muss die **Kavitationsschwelle** überschritten werden. Dies geschieht, wenn die Wechseldruckamplitude so groß ist, dass die Flüssigkeit an den oben genannten Störstellen aufreißt und zum Wachstum einer Blase führt. Die Viskosität des Wassers spielt bei Frequenzen unterhalb von 10 MHz keine Rolle für das Überschreiten der Kavitationsschwelle (Kuttruff, 1988). Der Energieeintrag zur Erzeugung des Unterdrucks wird in diesem Fall durch Ultraschall erzeugt, daher handelt es sich um sog. akustische Kavitation. Sie kann aber auch hydrodynamisch induziert sein (z.B. bei Schiffspropellern) oder durch gepulstes Laserlicht (optische Kavitation) erzeugt sein.

Man unterscheidet bei der Kavitation weiche Kavitation (auch Gaskavitation) und harte Kavitation (auch Dampfkavitation).

Bei der **weichen Kavitation** sind die Blasen mit in der Flüssigkeit gelöstem Gas gefüllt. Im Verlauf der Zeit diffundiert das Gas durch die Blasenwand, die Blase verkleinert sich langsam und löst sich auf. In dieser Zeit pulsieren die Blasen, d.h. sie schwingen und verändern dabei ihren Radius. In einem Schallfeld können sie dabei gerichtete Bewegungen ausführen und sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. Durch gleichgerichtete Diffusion können Blasen aber auch stabilisiert werden und dann über einen längeren Zeitraum schwingen (oszillieren). Zu harten Kollapsen kommt es bei der weichen Kavitation nicht, da das in den Blasen enthaltene Gas den Zusammenfall der Blase abbremst (Leighton 1994).

Bei der **harten Kavitation**, bei der ein höherer Energieeintrag notwendig ist und die für die Ultraschallreinigung bislang eine entscheidende Rolle spielt, enthalten die Blasen kein oder nur wenig Gas, ihre Füllung besteht stattdessen aus Flüssigkeitsdampf. Eine solche Blase fällt unter der äußeren Druckeinwirkung erst langsam, dann aber immer schneller zusammen, ein Vorgang, der als Blasenimplosion oder Blasen kollaps bezeichnet wird. Je größer dabei der Druckunterschied ist, desto heftiger wird der Blasen kollaps ausfallen. Findet der Blasen kollaps in der Nähe einer festen Wand statt, bildet er einen Flüssigkeitsstrahl (Mikrojet) aus, der die Blase durchstößt und in Richtung der festen Wand ausgerichtet ist (s. u.).

Ein Kriterium für harte Kavitation sind Kavitationsgeräusche, die von den Blasenimplosionen herrühren und als breitbandiges Kavitationsrauschen mit einem Hydrophon messbar sind.

Die Konzentration der Energie durch Kavitationsblasen bei ihrer Implosion kann zu recht extremen Verhältnissen führen.

Hier ein rechnerisch angenähertes Beispiel (nach Kuttruff, 1988, S. 356), da diese starken Parameteränderungen in den extrem kurzen Zeiträumen und bei kleinster räumlicher Ausdehnung noch nicht gemessen werden können:

Bei einem angenommenen Außendruck von 1 bar und Zimmertemperatur (293 K) verringere sich im Verlauf der Blasenimplosion das Volumen der Blase um den Faktor 10760. Ein solcher realistisch annehmbarer Wert kommt zustande, da eine Verringerung des Blasenradius um den Faktor 10 eine Volumenverringerung um den Faktor 1000 bewirkt.

Bei einem Ausgangsdruck von  $P_0 = 0,01$  bar (im Inneren der Blase) und dem statischen Außendruck von 1 bar, ergibt sich ein Enddruck von 4410 bar (Faktor 441000) und bei der Ausgangstemperatur  $T_0 = 293$  K steigt sie auf 12000 K an (Faktor 41).

Weiterhin entstehen hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Stoßwellen im Bereich der implodierenden Blase.

Als Kriterium für akustische Kavitation wird weiterhin das Auftreten von sog. subharmonischen Schwingungen gesehen. Das sind Spektralkomponenten bei ganzzahligen Bruchteilen der Anregungsfrequenz. Bei anwachsender Schalldruckamplitude treten im Spektrum der Blasenschwingung weitere Subharmonische oder gar Ultraharmonische (ganzzahlige Vielfache der Subharmonischen) in Erscheinung. Das Auftreten jeder neuen Subharmonischen ist an das Erreichen bestimmter Schwellenwerte der Wechseldruckamplitude geknüpft, was auch als Bifurkation bezeichnet wird (Lauterborn, W. und Kurz 2010).

Wird in einem Ultraschallbad gegenüber dem Tauchschwinger ein Reflektor angebracht oder befinden sich in diesem Bad zwei gegenüberliegende Tauchschwinger mit gleicher Parametereinstellung als schallmittierende Quellen, entsteht ein sog. **Stehwellenfeld** durch Überlagerung zweier gegenläufig fortschreitender Wellen gleicher Frequenz und Amplitude.

In realen **Kavitationsblasenfeldern** entstehen viele Kavitationsblasen, die sich gegenseitig beeinflussen und **Kavitationsstrukturen**, u.a. sog. Streamerfiguren (Abb. 10) bilden. Abbildung 10a zeigt eine sogenannte Streamerfigur, die durch die strukturierte Ansammlung von Kavitationsblasen im Stehwellenfeld entstanden ist. Abbildung 10b zeigt, dass auch bei 130 kHz Kavitationsstrukturen sichtbar sind. Diese Frequenz wurde auch im Rahmen der hier beschriebenen Versuche eingesetzt.

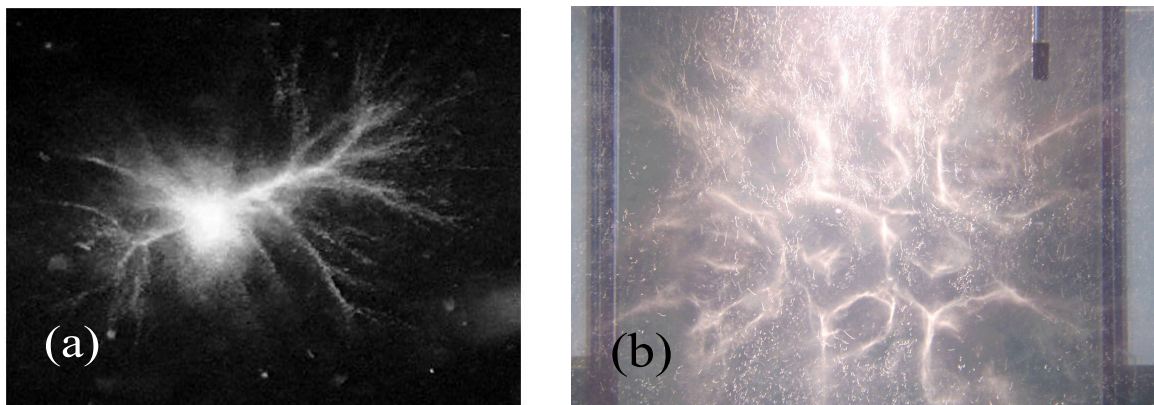


Abbildung 10: a) Streamerfigur (Filament) (Luther, 2000)  
b) Kavitationsstrukturen bei 130 kHz (DPI Göttingen, 2007)

Die Anordnung und das Verhalten der Kavitationsblasen werden u.a. durch Bjerkneskräfte beeinflusst.

Die **primäre Bjerkneskraft** bestimmt, welche Blasen sich an welcher Stelle im Schallfeld anordnen. In einem Stehwellenfeld ordnen sich kleine Blasen unterhalb der Resonanzfrequenz aufgrund von gleichphasiger Schwingung im Bereich der Schallbäuche an. Große Blasen, oberhalb der Resonanzfrequenz, ordnen sich, sobald sie die Resonanzgröße überschritten haben, aufgrund von gegenphasiger Schwingung im Bereich der Schallknoten an. Dämpfung aufgrund von Reibung in einem Medium bewirkt eine graduelle Wanderung dieser Blasen von den Schallbäuchen zu den Schallknoten. Ohne dämpfendes Medium wandern sie sprunghaft.

Die als **sekundäre Bjerkneskraft** bezeichnete Anziehungskraft, die zwischen zwei gleichphasig pulsierenden Kugeln besteht, gilt auch für Blasen. Somit strahlt jede pulsierende Blase eine sekundäre Kugelwelle an die umgebende Flüssigkeit ab und zieht damit andere gleichphasig schwingende Blasen an. Dadurch vereinigen sie sich zu größeren Blasen, bis sie ihre Resonanzgröße (**Minnaert-Resonanz**) überschrei-



ten und von den Schallbäuchen zu den Schallknoten wandern (Blasendynamik im Schallfeld).

Befindet sich eine Kavitationsblase in der Nähe einer starren, harten Wand, stülpt sich die Blase auf der der Wand abgewandten Seite ein, da sich die Blase in diesem Bereich mit einer größeren Geschwindigkeit nach innen bewegt. Die Einstülpung der Blase wandert mit immer größer werdender Geschwindigkeit nach innen und geht schließlich in einen feinen Flüssigkeitsstrahl, den sog. **Mikrojet** über, der mit großer Geschwindigkeit durch die Blase schießt (Abb. 11).

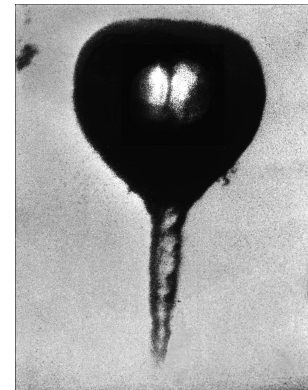


Abbildung 11: Mikrojet. Der Flüssigkeitsstrahl schießt von oben nach unten durch die Blase und ist in Richtung einer festen Wand ausgerichtet (Lauterborn, W. et al., 1999).

Diese Mikrojets sind gleichsam, wie feinste Meißel, verantwortlich für die Reinigung von Oberflächen, indem sie festsitzende, auch kleinste, Partikel abzulösen vermögen. Die Parameter müssen hier allerdings sehr sorgfältig eingestellt werden, denn diese Form der Kavitation kann auch Oberflächen angreifen und abtragen, was als Kavitationsfraß oder **Kavitationserosion** bezeichnet wird. Ob Zerstörung stattfindet, hängt dabei von dem Material der Oberfläche, der kavitierenden Flüssigkeit, der Frequenz und der Intensität des eingetragenen Schalls ab. Bei Kavitation in Wasser treten bei gleichem Leistungseintrag größere Erosionsschäden auf, als in Alkohol oder Tetrachlorkohlenstoff. Der Grund dafür ist im höheren Dampfdruck dieser Stoffe zu sehen, der dem Außendruck entgegenwirkt und damit die Heftigkeit der Blasenimplosion vermindert. Die Blasen selbst enthalten weiterhin mehr gelöstes Gas, welches im Endstadium der Heftigkeit des Kollapses zusätzlich entgegenwirkt. Besonders starke Schäden sind hingegen bei Kavitation in Quecksilber beobachtet worden, wegen seines geringen Dampfdruckes und seiner großen Dichte. Durch diese und insbesondere auch die hohe Oberflächenspannung ist der Blasenkollaps heftiger.

Nach wie vor ist die gleichmäßige Abreinigung der Flächen durch die ungleiche Schallfeldverteilung ein Problem. Einen Lösungsansatz hierfür liefert die „akustische Bürste“ (siehe Seite 41).

Hohe Schallfrequenzen haben den Vorteil, dass sich der Schall leichter bündeln und in eine gewünschte Abstrahlrichtung lenken lässt, womit sich hohe Energie- und

Leistungsdichten erzielen lassen, die für die Reinigung effektiver genutzt werden können.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass bei niedrigen Ultraschall-Frequenzen (z.B. 20-50 kHz) mit weniger Energieeintrag eine größere Eindringtiefe realisiert werden kann. Die Kavitationsblasen sind hier größer und die Kavitationsschwelle liegt tiefer, aber bei vergleichbaren Rahmenbedingungen auch das Zerstörungspotential. Je höher die Ultraschall-Frequenz gewählt wird, desto feiner werden die Blasenstrukturen (da die für das Wachstum der Blasen verfügbare Zeit kürzer ist) und desto schonender auch die Reinigung. Allerdings ist die Dämpfung des Schalls dann entsprechend höher und damit verbunden sind auch die Reichweiten geringer bzw. der Energiebedarf wird höher.

Die Reinigung über harte Kavitation birgt, wie in der Literatur beschrieben, immer auch die Gefahr von Materialschäden.

Eine **Ultraschallreinigungsanlage** besteht traditionell aus einer Reinigungswanne mit einer Reinigungsflüssigkeit. Im Beckenboden oder auch seitlich angebracht befinden sich Ultraschallwandler, die bei den heutigen Anwendungen zumeist als piezoelektrische Verbundschwinger ausgeführt sind. Piezoelektrisches Material erfährt beim Anlegen einer Wechselspannung eine Dickenänderung im piezoelektrischen Material. Dadurch wird es zur Schwingung mit einer bestimmten Eigenfrequenz angeregt, die abhängig von der Dicke des piezoelektrischen Materials ist. Entsprechend seiner Eigenfrequenz strahlt das piezoelektrische Material Schall ab.

Weiterhin benötigt eine Ultraschallreinigungsanlage einen elektrischen Generator zur Speisung der piezoelektrischen Wandler. Die piezoelektrischen Verbundschwinger wandeln die elektrische Energie in akustische Signale mit einer bestimmten Frequenz, die sie in die Reinigungsflüssigkeit, an die sie angekoppelt sind, einstrahlen.

Die Ultraschallwandler können auch als Tauchschwinger ausgeführt sein. Diese bestehen aus mehreren Einzelwandlern (piezoelektrische Verbundschwinger), die in ein dichtschießendes flaches Gehäuse, vorzugsweise aus Edelstahl, eingebettet sind. Der Schall wird durch eine der beiden Wände nach außen übertragen. Diese haben den Vorteil, dass sie in verschiedene Gefäße eingehängt werden können, ohne dass diese entleert werden müssen, sie können auch problemlos nachgerüstet werden oder durch ihre Mobilität in unterschiedliche Tanks eingehängt werden.

Die piezoelektrischen Verbundschwinger bestehen in der Regel aus zwei piezoelektrischen Scheiben, die eine entgegengesetzte Orientierung der Polarisierung besitzen. Diese symmetrisch gebauten Schwinger sind zur Materialersparnis kraftschlüssig mit zwei Endstücken aus anderem Material verbunden. Ansonsten müsste für die Erzielung der bei Reinigungen üblichen Frequenzen von 20-100 kHz sehr viel des teuren piezoelektrischen Materials verwendet werden (Beispiel: eine Quarzscheibe von 1 cm Dicke hat eine Grundresonanz bei 285 kHz, dementsprechend bräuchte man

sehr viel Material. Bei 28,5 kHz bräuchte man z.B. eine Quarzscheibe von 10 cm Dicke).

Durch die bereits erwähnte Ungleichverteilung des Schallfeldes ist es hilfreich das Reinigungsgut zu bewegen. Auch eine schnelle Bewegung und Durchmischung der Flüssigkeit fördert den Reinigungsprozess erheblich, da damit verbrauchtes und mit gelösten Verunreinigungen belastetes Wasser abtransportiert wird. Der Schall erreicht die zu reinigenden Bereiche kontinuierlich, wodurch weiterer Schmutz entfernt werden kann.

Verantwortlich für den Reinigungsprozess ist die Kavitation, wobei die Abreinigung durch Mikrojets erfolgen kann oder aber auch durch starke Wechseldruck- oder Strömungsgradienten oder Blasenoszillationen (pulsierende Blasen). Diese führen nicht nur zur Auflösung löslicher Verunreinigungen, sondern lockern und entfernen auch unlösliche Schmutzteilchen. Auf den zu reinigenden Flächen befinden sich u.a. durch ihre Unebenheit Kavitationskeime in ausreichender Zahl. So können auch Oberflächen mit Vertiefungen, oder schwer zugänglichen Stellen, gereinigt werden. Das gilt auch für Teile, die mit anderen Mitteln schlecht gereinigt werden können oder sehr empfindlich sind.

### 2.2.2 Parameterauswahl

#### Frequenz

Die Auswahl der Frequenz zur Reinigung eines Gegenstandes hängt in erster Linie von der Empfindlichkeit des Reinigungsgutes ab. Niedrige Frequenzen können verwendet werden, wenn das Reinigungsgut relativ unempfindliche Oberflächen besitzt.

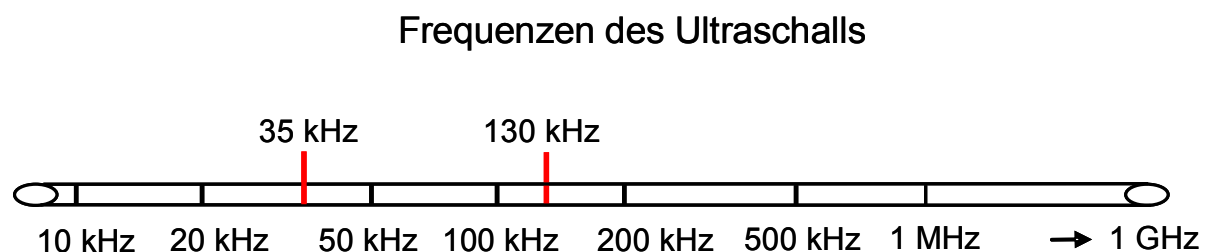


Abbildung 12: „Frequenzstrahl“ in logarithmischer Skala

Je empfindlicher die Oberflächen werden und desto feiner die Reinigung werden soll oder wenn auch engere Zwischenräume oder Spalten gereinigt werden sollen, desto höher sollte die Frequenz sein. Das liegt darin begründet, dass die kavitierenden Blasen kleiner sind je höher die Frequenz ist (siehe auch Tab. 4, S. 99). Kleinere Blasen reinigen die Oberflächen feiner und weicher ab.

Für das im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von Ultraschall gereinigte, getauchte Membranmodul wurden die Frequenz von 130 kHz, sowie die Frequenz von 35 kHz eingesetzt, die auf dem „Frequenzstrahl“ (Abb. 12) rot markiert sind.

Bei den nach dem Stand der Forschung eingesetzten und bei Membranen verwendeten Frequenzen wurden meist 20-50 kHz eingesetzt, welche für die Ultraschallreinigung auch die üblichen Frequenzen industrieller Anwendungen sind. Hier wurden jedoch fast immer Schäden gefunden, aussagekräftige Integritätstests wurden nicht durchgeführt. Dort, wo 100 kHz (Kobayashi et al., 2003) oder 200 kHz (Kyllönen et al., 2006) verwendet wurden, wurde immer dieselbe Intensität verwendet, wie bei den anderen Frequenzen, die von 20-50 kHz reichten. Demzufolge war durch unzureichende Reinigung bei den Membranen kaum Flusserhöhung erkennbar, insbesondere bei 200 kHz. Nach dem Oben gesagten ist dies dadurch erklärbar, dass bei den hohen Frequenzen die Intensität und damit auch der Energieeintrag höher sein muss, um Reinigungsleistung durch Kavitation in gewünschtem Maße zu erzielen. Möglicherweise war die Intensität zu gering, um überhaupt erst einmal die Kavitationsschwelle zu überschreiten, was sich mit der Aussage von Kobayashi et al. deckt, dass sie bei 100 kHz wenig Kavitation beobachten konnten. Vielfach werden in den Beiträgen die verwendeten Intensitäten oder Energieeinträge nicht genannt, die jedoch im Zusammenspiel mit der verwendeten Frequenz entscheidend sind. Da Membranschäden dauerhaft ein Problem darstellten, bietet es sich hier an, eine höhere Frequenz zu verwenden, die durch wesentlich kleinere und feiner verteilte Kavitationsblasen deutlich schonender abreinigt.

## **Intensität**

Um Kavitation in der Flüssigkeit zu erreichen, muss die Intensität des eingebrachten Ultraschalls hoch genug sein, um die Kavitationsschwelle zu überschreiten.

Für die Versuchsanlage im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Intensität von 2,1 Watt/cm<sup>2</sup> Wandlerfläche gewählt. Die zwei gegenüberliegenden Tauchschwinger besitzen je 48 Wandlerelemente (piezoelektrische Verbundschwinger), auf deren Fläche die Energieabstrahlung bezogen wurde.

Diese Intensität wurde von der Fa. Elma ausgewählt, da mit diesem Wert die Schwelle für transiente Kavitation bei 35 kHz bei weitem überschritten wird, jedoch bei 130 kHz gerade noch nicht erreicht wird. Als Kavitationsschwelle wird hier der Wert für transiente Kavitation verstanden. Dieser Wert wird ermittelt, indem das Einsetzen der

Kavitation bei gegebener Frequenz in entgaster und gereinigter Flüssigkeit in Abhängigkeit der Intensität gemessen wird. Bei transienter (auch harter) Kavitation wird davon ausgegangen, dass die entstehenden Kavitationsblasen vorwiegend mit Wasserdampf gefüllt sind. Sie sind in der Lage mit einem Kollaps zu implodieren und in der Nähe von festen Wänden Mikrojets auszubilden. Weiche Kavitation mit vorwiegend Gas in den Kavitationsblasen bei nicht entgasten Flüssigkeiten kann dabei schon bei einer deutlich geringeren Intensität eintreten.

Das Unterschreiten der Schwelle für transiente Kavitation bei 130 kHz sollte der Sicherheit im Versuchsaufbau dienen und das Risiko für Membranschäden vermindern.

Nach Jung und Sobotta (2009) ergibt sich bei Stehwellenfeldern (durch gegenüberliegend angebrachte Tauchschwinger oder eine reflektierende Wand) eine 85% höhere Energieeffizienz gegenüber einem Ultraschallbad mit nur einem Schwinger.

### **Beschallungsdauer**

Um herauszufinden an welcher Stelle des Filtrationszyklus der Ultraschall erfolgreich eingesetzt werden kann, muss er an verschiedenen Stellen in der Verfahrensabfolge testweise eingesetzt werden. Es ist also herauszufinden, an welcher Stelle des Filtrationszyklus der Ultraschall tatsächlich reinigend wirkt, also erfolgversprechend eingesetzt werden kann. Ist dies gegeben, kann mit kontinuierlichen Versuchsreihen begonnen werden.

Dazu wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst mit der Dauer von einer Minute getestet. Je nach Reaktion der Membran bei den Werten Permeabilität und Trübung kann anschließend entschieden werden, ob die Beschallungsdauer verlängert oder verkürzt werden kann.

Die Variation der Beschallungsdauer gibt dann Aufschluss über den Einfluss dieses Parameters.

### 3. Stand der Forschung

Um dem Problem des Fouling auf den Membranoberflächen zu begegnen, ist eine Anti-Fouling Strategie der Membranhersteller, die Hydrophilität der Membranen zu erhöhen. Die zumeist hydrophoben Schmutzteilchen werden somit verstärkt abgestoßen, bei einem verbesserten Fluss der wässrigen Phase durch die Membran. Die Deckschicht ist durch verminderte Adhäsionskräfte somit auch leichter von der Membranoberfläche ablösbar. Weiterhin unterstützend gegen Fouling wirken Entwicklungen der Modulhersteller zur besseren Überströmbarkeit der Membranflächen in den Modulen, womit weniger Totzonen entstehen, in denen sich Stoffe akkumulieren können.

Die Degussa-Hüls AG hat eine als Creafilter bezeichnete, beschichtete Membran entwickelt, deren Grundlage ein biegsames Metallgewebe mit einer Keramikfolienbeschichtung ist. Somit ist die Oberfläche robust und relativ unempfindlich gegen Fouling, zusätzlich besitzt sie die Fähigkeit elektrischen Strom zu leiten (Kuppinger et al., 2001).

Untersuchungen des Institutes für Polymerforschung in Dresden haben ein Verfahren zur Modifizierung von Polypropylen-Hohlfasermembranen mit hydrophilen Polymeren entwickelt. Der hier vergleichsweise geringere Permeatdurchsatz der modifizierten Membran wird nach Aussage der Autoren durch deutliche Verringerung des Membranfoulings mehr als kompensiert (Meier-Haack und Carroll, 2001).

Zur Vermeidung des Permeabilitätsrückganges infolge von Deckschichtbildung und Fouling werden die meisten Membranen rückgespült, wobei Permeat von der Permeatseite her durch die Membran gedrückt und damit die Ablösung der im Filtrationsprozess entstandenen Deckschicht gefördert wird. Bei einigen Membranmodulen können die Membranoberflächen zusätzlich mit Luftblasen überströmt werden. Dadurch wird während des Filtrationsbetriebes im Cross-Flow-Verfahren bei Membranbelebungsanlagen neben dem Sauerstoffeintrag eine zu starke Deckschichtbildung vermindert. Dies setzt eine vertikale Anordnung der Module voraus sowie einen Betrieb im sog. Out/In-Modus. Das bedeutet, dass sich die abgetrennten, deckschichtbildenden Stoffe auf den Außenseiten der Membranen ablagern und somit durch die Scherwirkung der Luftblasen erreicht werden können.

Es gibt zahlreiche Untersuchungen dahingehend, dem Fouling mit Hilfe von Ultraschall entgegenzuwirken.

In Frankreich (Masselin et al., 2001) wurde der Effekt der Beschallung mit Ultraschall an polymeren UF-Membranen untersucht. Verwendet wurde eine Frequenz von 47 kHz, die Leistung wurde nicht angegeben. Während Polyethersulfon (PES) -Membranen bei den angewandten Bedingungen vollständig geschädigt wurden (Löcher mit bloßem Auge sichtbar), erwiesen sich die Schäden bei Polyacrylnitril (PAN) - und Po-

lyvinylidendifluorid (PVDF) -Membranen als geringer. Die Membranen befanden sich in einem Wasserbad mit deionisiertem Wasser und waren der Beschallung in Etappen von insgesamt 2 Stunden ausgesetzt. Die Schäden traten aber schon nach 5 Minuten auf.

Eine australische Studie (Muthukumaran et al., 2004) untersuchte Ultraschalleinwirkungen bei der Molke-Filtration über polymere Ultrafiltrationsmembranen. Die verwendete Ultrafiltrationsflachmembran bestand aus Polysulfon und hatte eine Trenngrenze von 30.000 g/mol (30 kD) sowie eine Größe von 30 cm<sup>2</sup>. Sie wurde in einen Rahmen eingespannt und filtrierte eine 6 prozentige Molke-Lösung, die aus Molke-Pulver und destilliertem Wasser hergestellt war. Zur Reinigung wurde die Membran in ein Ultraschall-Tauchbad eingehängt und mit einer Frequenz von 50 kHz beschallt. Die Ultraschallwandler hatten eine Leistung von 300 Watt. Es wurden Ultraschall-Versuchsreihen in destilliertem Wasser sowie unter Zusatz von Detergentien durchgeführt. Nach Beschallung wurde festgestellt, dass die erhaltene Permeabilität die ursprüngliche Permeabilität in keinem Fall übertraf, ein Zeichen dafür, dass die Membran intakt geblieben ist. Die Autoren finden im Gegensatz zu Masselin et al. keine Schäden an der Membran. Sie schließen daraus, dass bei Masselin et al. eventuell die die Membran erreichende Ultraschall-Leistung höher war. Weiterhin stellten sie fest, dass das Vorhandensein einer Cross-flow-Strömung verhindert, dass zuviel Kavitation wiederholt an genau der selben Stelle entsteht und die Membran auf diese Weise nicht punktuell belastet wird. In den Versuchsreihen wurde festgestellt, dass eine Beschallungsdauer von 10 min ausreicht und eine Verlängerung keinen weiteren Effekt ausübt. Auch eine geringfügig verlängerte Filtrationsdauer schien keinen Effekt auf den Reinigungsvorgang zu haben. Dagegen zeigte der verstärkte Einsatz von Ultraschall-Leistung einen deutlichen Anstieg der Permeabilität. Die Zugabe eines anionischen Tensides zeigte zusammen mit Ultraschall Synergieeffekte bei der Membranabreinigung. Es wird davon ausgegangen, dass neben der akustischen Kavitation (Blasenkollapse mit der Ausbildung von Mikrojets) auch akustisches Strömen und die Generation von Scherkräften durch Strömung für die Reinigung mitverantwortlich sind. Energieeinsparung wird von Muthukumaran et al. und Ashokkumar et al. diskutiert über kürzere Beschallungsdauer und eventuell gepulsten Ultraschall, verbunden mit einer verlängerten Filtrationsphase. Weiterhin könnten chemische Reinigungsphasen verlängert werden und bei der Anwendung von Detergentien zusammen mit Ultraschall wären Einsparungen von Chemikalien sowie an Energie für den Ultraschall möglich (Muthukumaran et al., 2004).

In einer finnischen Studie (Kyllönen et al., 2006) wurde die Beschallung mit Ultraschall an Testmodulen zur Filtration von Abwasser aus der Papierindustrie untersucht. Getestet wurden keramische Membranen und die Ultrafiltrationsmembran PES-50H der Fa. Microdyn-Nadir. Sie verwendeten Frequenzen von 27, 40 und 200 kHz mit verschiedener Intensität. Bei Beschallung von der Rohwasserseite konnten

sie in der Regel eine deutliche Flusserhöhung während des Filtrationsprozesses feststellen. Nur bei einigen Mikrofiltrationsmembranen führte dies zur Verstopfung. Energie für die Beschallung ließ sich einsparen, wenn während einer Filtrationspause beschallt wurde; hier reichten 2 Sekunden Beschallungsdauer aus. Bei Atmosphärendruck war das Schallfeld nicht so ungleich verteilt wie unter Druckbedingungen, bei denen mehr Energie aufgebracht werden musste, um die Kavitationsschwelle zu erreichen. Beschallungen mit den Frequenzen 27 und 40 kHz zeigten Verschleißerscheinungen an den Membranoberflächen, insbesondere bei der polymeren Membran, aber auch bei den keramischen Membranen, die unter den Druckverhältnissen im Betrieb und höherem Energieeintrag deutlichere Schäden zeigten. Da unter Druckverhältnissen die Kavitationsschwelle erst bei höherem Energieeintrag überschritten wird, danach aber die Blasenkollapse umso heftiger ausfallen, können vermehrt Schäden erzeugt werden. Auch ein hoher Verschmutzungsgrad des zu reinigenden Wassers erforderte mehr Energie und förderte damit die Membranzerstörung, wobei die Autoren der Ansicht sind, dass sich reale Deckschichten schwerer abreinigen lassen als einheitlich zusammengesetzte Modelldeckschichten. Der Vergleich von 27 kHz mit 200 kHz bei gleichem Energieeintrag zeigte bei der PES-Membran mit 27 kHz eine deutliche Flusserhöhung, mit 200 kHz hingegen kaum. Eine Überströmung im Cross-flow-Verfahren mit einer Distanz von 1 cm Abstand der Schallwandler von der Membran zeigte geringere Membranschäden. Die Autoren haben aber eine etwaige Beeinflussung der Permeatqualität durch die Behandlung mit Ultraschall nicht untersucht. Sie sind der Ansicht, dass noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden muss, bis ein solches Verfahren in einem industriellen Maßstab angewandt werden kann.

Eine Studie aus den USA (Lamminen et al., 2006) untersuchte die Effekte von Ultraschall mit unterschiedlichem Leistungseintrag bei einer PVDF-Membran sowie einer keramischen Membran. Die in der Arbeit eingesetzte Frequenz ist die Resonanzfrequenz des verwendeten Schallschwingers und beträgt 476 kHz. Es wurde festgestellt, dass die kurzfristig und künstlich mit Latex-Partikeln verschmutzten Membranen ohne Zerstörung abgereinigt werden können, wenn die dem Schallgeber zugeführte Leistung unterhalb von 7,2 Watt bei einer Schallsendergröße von 38 mm Durchmesser und einem Membranabstand von 0,86 mm parallel zum Schallsender liegt. So konnte gezeigt werden, dass die untersuchte PVDF-Membran bei einer Leistung unterhalb von 7,2 Watt nahezu sauber wurde, mit einer Leistung von 7,2 Watt und höher sich aber neben vollständiger Abreinigung Löcher zeigten. Gepulster Ultraschall (1 Sekunde an, 10 Sekunden aus) zeigte neben Energieeinsparung geringere Reinigungswirkung, jedoch auch keine Membranzerstörung.

Eine weitere Studie aus den USA (Chen et al., 2006) untersuchte Ultraschalleinwirkungen bei einer Frequenz von 20 kHz bei mit anorganischen Siliziumpartikeln künstlich verschmutzten keramischen Flach-Membranen. Sie stellten fest, dass, sobald



sich die Membran im Bereich des Kavitationsfeldes befindet, sie eindeutig zerstört wird, wobei die Zerstörungen rein mechanischer Natur sind und nicht chemischer. Befindet sich die Membran aber außerhalb des Kavitationsfeldes, jedoch noch nah genug an der Schallquelle, zeigt sich eine flusserhöhende Reinigungswirkung ohne die Membran zu zerstören. Die Reinigungswirkung wird dabei auf „acoustic streaming“ (durch Schall hervorgerufene Strömung) und ultraschallbedingte Verwirbelungen zurückgeführt. Die Reinigungswirkung ist dabei umso besser, je näher sich die Membran an der Ultraschallquelle befindet, solange sie außerhalb des Kavitationsbereiches liegt. Bei Erhöhung des Filtrationsdruckes erhöht sich die Foulingneigung der Membran. Gleichzeitig ist die Reinigungskraft durch den Ultraschall geringer, obwohl die Blasenkollapse stärker sind. Um Energie einzusparen wurde die Beschallung gepulst. Ein annähernd gleiches Reinigungsergebnis wie mit kontinuierlich eingeschaltetem Ultraschall konnte aber nur beobachtet werden, wenn die Abschaltphase sehr kurz war (1 Sekunde an, 0,1 Sekunden aus). Hiermit konnten 10% an Energie für den Ultraschall eingespart werden.

Eine japanische Studie (Kobayashi et al., 2003) untersuchte die Effekte der Ultraschallbehandlung bei einer PS-UF-Membran (Trenngrenze 100 kD) sowie einer Cellulose-MF-Membran (nominelle Porenweite 0,2  $\mu\text{m}$ ) bei Filtration von Pepton- und Milchlösung. Es wurden die Frequenzen 28 kHz, 48 kHz und 100 kHz verwendet, beim Einsatz einer Schallintensität von 23 W/cm<sup>2</sup>. Die Schallgeber waren außerhalb des Wasserbad-Gefäßes angebracht. Filtrationsdruck und Temperatur wurden konstant gehalten, so dass die Effekte des Fouling bzw. der Reinigung über die Veränderung des Flusses visualisiert werden konnten. Bei der Filtration von sauberem Wasser bei der verschmutzten Membran konnte gezeigt werden, dass mit 28 kHz die größte Flusserhöhung beobachtet werden konnte, bei 48 kHz und 100 kHz fiel die Flusserhöhung in abnehmender Tendenz geringer aus. Bei Ultraschallbehandlung während der Filtration von Pepton- und Milchlösung zeigte nur die Behandlung mit der Frequenz von 28 kHz eine deutliche Flusssteigerung. Während die Autoren bei 28 kHz deutlich Effekte der Kavitation beobachten konnten, sahen sie bei 100 kHz weniger Kavitationseffekte. Sie machten jedoch keinerlei Aussagen über die Membranintegrität.

Eine weitere japanische Studie (Latt et al., 2006) untersuchte die Einwirkung von Ultraschall mit einer Frequenz von 28 kHz bei einem MF-Hohlfaser-Kapillarmodul aus Polyethylen unter Einwirkung von Reflektionstechnik. Das Membranmodul, bestehend aus 240 Hohlfaser-Kapillaren mit 0,8 cm Durchmesser und 8 cm Länge, hatte eine Membranfläche von 0,05 m<sup>2</sup> mit einer Porengröße von 0,4  $\mu\text{m}$ . Sie befand sich in einem Tauchbad mit außerhalb des Gefäßes seitlich angebrachten Schallgebern. Filtriert wurde eine einprozentige Milch-Lösung. Es wurde festgestellt, dass eine mittlere Tiefe im Ultraschallbad sowie eine mittlere Entfernung von den Schallgebern die günstigsten Reinigungsergebnisse brachte. Die Begründung dafür zeigte sich in der

Schalldruckverteilung, in deren Maxima sich vermehrt Kavitationsblasen bildeten. Befand sich hinter dem Membranmodul ein konkav geformter Reflektionsteller, so verstärkte sich die Kavitation im mittleren Bereich des Tauchbades, was durch verstärkte Sonolumineszenz (Leuchten, bedingt durch freiwerdende Energie aus Kavitationsblasenkollapsen) gezeigt werden konnte. Es wurden auch hier keine Integritätstests durchgeführt und auch Ablaufwerte wurden nicht kontrolliert. Jedoch waren auf Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen keine deutlichen Schäden zu erkennen.

Das vom BMWi-geförderte Verbundprojekt „In-situ Ultraschallabreinigung für Kleinmembransysteme in der Trinkwasseraufbereitung“ (Endbericht 30.6.2007), an dem die Universität Duisburg-Essen, die Universität Stuttgart, das Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme sowie die Firmen Grünbeck Wasseraufbereitung, Hielscher Ultraschall-Technologie und ItN Nanovation beteiligt waren, untersuchte die Möglichkeit, Membranen mit Hilfe von Ultraschall und ohne Chemikalien zu reinigen. Hier wurden Druckmembranmodule verwendet und die Ultraschallschwinger mussten aufwändig in das Modul integriert werden. Infolge der Anwendungen traten Schäden an den Membranen auf, die auf Ultraschallkavitation zurückgeführt wurden. Reinigungsmechanismen wurden nicht untersucht. Die beteiligten Firmen äußerten sich gegenüber dem Projekt dahingehend, dass die Technologie zu hohe Kosten und Aufwand sowie durch teure Komponenten geprägt ist, einen zu hohen Energiebedarf aufweist und im Verhältnis dazu einen zu geringen Nutzen hat. Ferner sei das System zu unsicher, da die Membranen durch Kavitation zu häufig beschädigt würden. Eine Erschließung entsprechender Märkte mit einem solchen Produkt sehen die Firmen daher zum Zeitpunkt der Berichtlegung nicht. Die Fa. Hielscher Ultrasonics äußert sich im Kapitel Nutzen und Verwertung des Abschlussberichtes, wie folgt: „Die ursprünglichen Ziele, die Vermarktung von Ultraschallprozessoren als Komponenten von Trinkwasseraufbereitungsanlagen, können in den kommenden Jahren nicht erreicht werden. Die bisherigen Entwicklungsarbeiten haben eine Reihe Erkenntnisse gebracht, aber noch lange nicht zu einem Prototyp geführt, der als Aussage für eine stabile, vermarktungsfähige Lösung gelten kann.“ „Ein Marktpotenzial für die Ultraschallprozessoren als Komponenten der Trinkwasseraufbereitungsanlagen ist derzeit nicht erkennbar.“

Ein Hindernis für die breite technische Anwendung von akustischen Kavitationsfeldern zum Zweck der Reinigung liegt ferner in ihrer schlechten Beeinflussbarkeit. Da bei der Ultraschallreinigung über Kavitationsfelder die teilweise sehr ungleichmäßige Abreinigung der Flächen ein generelles Problem ist, wurden in dem BMBF-Verbundprojekt „Untersuchung von Kavitationsfeldern“ Möglichkeiten zur gezielten Steuerung akustischer Kavitation untersucht. In diesem stand besonders die Anwendung in Ultraschallreinigungsbadern im Mittelpunkt des Interesses, wobei versucht wurde, Objekte kontrollierter und homogener zu reinigen. Als beispielhafte Idee diente im Projekt der Begriff der akustischen Bürste, womit die verbesserte Reinigung durch räum-

liche Bewegung von Blasenfeldern über ein Objekt hinweg gemeint ist. Zum Abschluss des Projektes ließ sich eine „akustische Bürste“ (Resonator mit phasengesteuerter Kavitationsverschiebung) realisieren (W. Lauterborn und Mettin, 2004).

### **3.1 Aufgabenstellung**

In früheren Untersuchungen wurden Membranen durch die Beschallung mit Ultraschall häufig zerstört (Masselin et al., 2001), (Flemming et al., 2007). Daher muß die Frage gestellt werden: Ist es möglich, Filtrationsmembranen zuverlässig mit Ultraschall zu reinigen, ohne sie zu zerstören oder anderweitig zu schädigen? Zur Beantwortung dieser Frage ist zu untersuchen, wie die Parameter eingestellt sein müssen, damit eine Filtrationsmembran zuverlässig und möglichst gleichmäßig abgereinigt werden kann. Da sie nicht beschädigt oder die Trennleistung bzw. der Rückhalt nachteilig beeinflusst werden darf, muss die Filtratqualität ständig überprüft werden. Die Parameter Frequenz, Intensität und Beschallungsdauer müssen sorgfältig gesucht und aufeinander abgestimmt werden. An welcher Stelle im Verfahrensablauf des Filtrationsprozesses ist der Ultraschall einzusetzen? Kann der Einsatz während des laufenden Betriebes erfolgen? Weiterhin ist im Falle eines funktionierenden Verfahrens der Energiebedarf zu berechnen, und es ist gegebenenfalls nach Optimierungsmöglichkeiten zur Energieeinsparung zu suchen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Ergebnisse einer Versuchsanlage vorgestellt, die zweistraßig aufgebaut ist, um die Werte einer mit Ultraschall behandelten Membran mit einer nicht mit Ultraschall behandelten Membran unter gleichen Rahmenbedingungen direkt miteinander vergleichen zu können. Diese Anlage bereitet über polymere, getauchte Ultrafiltrationsmembranen Oberflächenwasser zu Trinkwasser auf. Die Ergebnisse werden zeigen, ob ein Verfahren, welches oben genannte Ansprüche erfüllt, realisierbar ist und wie hoch der Energiebedarf einer entsprechenden Anlage ist. Eine Modellrechnung soll aufzeigen, ob es möglich ist, eine solche Anlage auch energieautark zu betreiben, beispielsweise mit Solar- und Windenergie.

## 4. Experimenteller Teil

### 4.1 Die Versuchsanlage

Für verschiedene Versuchsreihen einsetzbar, wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, mit deren Hilfe festgestellt werden kann, ob und wie ein Ultraschallreinigungsverfahren bei Membranen erfolgreich sein könnte. Dazu dienen zwei gleichwertig aufgebaute Versuchslinien mit jeweils einem baugleichen, getauchten Membranmodul. So kann unter den gleichen Rahmenbedingungen, wie Temperatur und Wasserqualität, der Membranfiltrationsprozess mit und ohne Ultraschall untereinander verglichen werden. Entscheidend, auch gegenüber früherer Forschung, ist der Beweis der Membranintegrität, die bei diesem Versuchsaufbau über online-Trübungsmessung und online-Partikelzählung kontrolliert wird. Zusätzlich wurden Laboranalysen durchgeführt.

Bei diesem Aufbau befindet sich die getauchte Membran in einem Filtrationstank, der das zu filtrierende Rohwasser enthält. Im Gegensatz zu druckgetriebenen Membransystemen ist dieser Behälter offen, auf ihn wirkt nur der äußere Atmosphärendruck. Das Permeat wird auf der Innenseite der Membran durch Erzeugung eines Unterdrucks abgezogen. Zur Erzeugung des Ultraschalls werden zwei Tauchschwinger, die in ihrem Edelstahlgehäuse zahlreiche piezoelektrische Wandler enthalten, in den Rohwassertank eingehängt. Die Schallabstrahlung der Tauchschwinger erfolgt dabei **parallel** zu den Membranflächen. Abbildung 13 zeigt die Versuchsanordnung zur Ultraschallreinigung eines Membranmoduls, bestehend aus parallel angeordneten Membrantaschen. Der Abstand von der Oberfläche der Ultraschall-Tauchschwinger zum Membranmodul beträgt 10 cm.

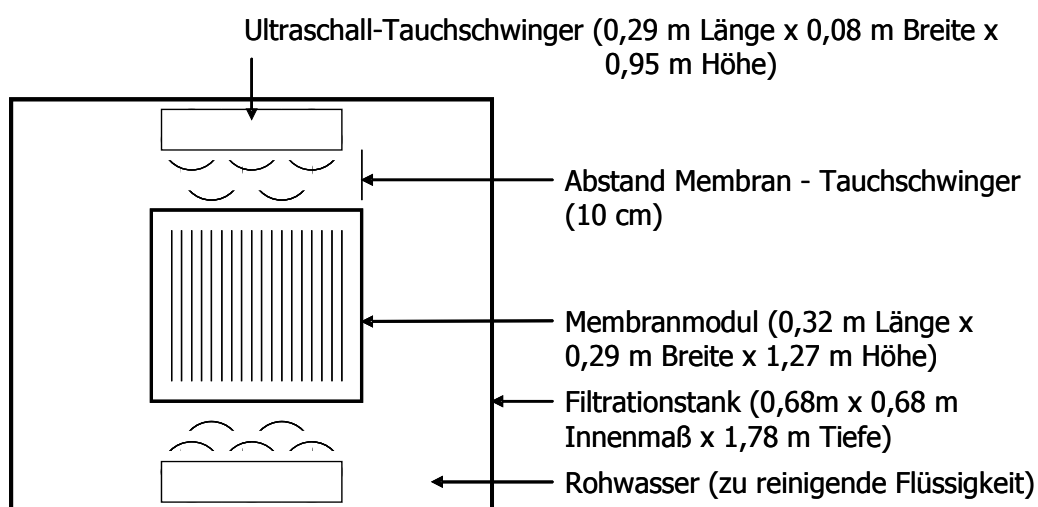


Abbildung 13: Blick von oben auf die Versuchsanordnung

Dadurch, dass das System nicht unter Druck steht, ist davon auszugehen, dass die Kavitationsschwelle hier leichter überschritten werden kann, die Kavitation aber gleichzeitig nicht zu hart wird und damit weniger Erosionspotential besitzt.

Bei der verwendeten Membran (Abb. 14 rechts) handelt es sich um eine hydrophilierte Polyethersulfonmembran (Typ UP 150T) der Fa. Microdyn-Nadir (Wiesbaden). Es ist eine Ultrafiltrationsmembran mit einer Trenngrenze von 150 kD (Molekülmasse 150 000 g/mol) entsprechend etwa 0,03 µm Porenweite. Das hält Bakterien (ca. 0,5 x 1,1 µm) sicher zurück. Auch Viren werden in der Regel zurückgehalten (ein Influenzavirus hat beispielsweise eine Größe von ca. 0,1 µm).

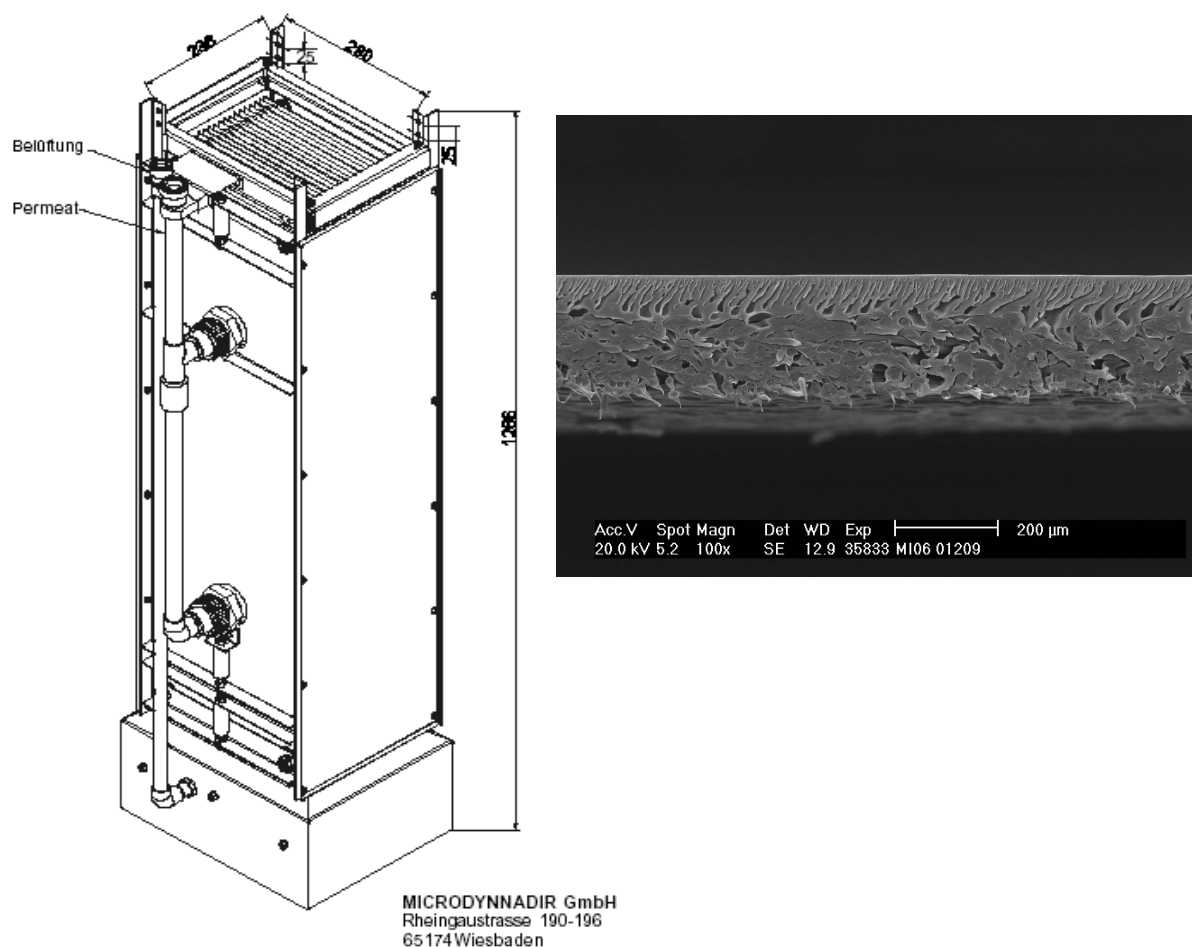


Abbildung 14: links: Membranmodul Biocel (BC-10), rechts: Querschnitt durch die Ultrafiltrationsmembran. Die trennaktive Schicht (oben) ist verbunden mit der porösen PE-Stützschiicht (unten). Beide Abbildungen mit freundlicher Genehmigung der Fa. Microdyn-Nadir.

Die Membranen, auf einer porösen PE-Stützschiicht auflaminiert, sind zu einer sog. Membrantasche zusammengeschweißt. Durch ein in der Mitte befindliches Vlies, einen sog. Permeatspacer (Drainagevlies), wird das filtrierte Wasser (Permeat) zu den Absaugstutzen transportiert. Ein Membranmodul besteht aus 20 parallel angeordneten Membrantaschen, die einen Abstand von 1,25 cm zueinander haben. Das hier verwendete Membranmodul (Abb. 14 links) wird als BC-10 bezeichnet und hat 10 m<sup>2</sup> Membranfläche.

Es handelt sich hier um eine Modulkonstruktion mit Flachmembranen, die erstmals auch rückspülbar sind. Somit sind zwei weitere Funktionen gegeben, die für eine Reinigungsanwendung mit Ultraschall erfolgversprechend erscheinen. Das ursprünglich für den Einsatz in Membranbelebungsanlagen bei der Abwasserreinigung eingesetzte Modul „Biocel“ wurde in den folgenden Versuchsreihen zum ersten Mal für die Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächenwasser (Flusswasser) eingesetzt.

Die an der Behälterwand der Filtrationstanks befestigten Ultraschall-Tauchschwinger befinden sich in einem Abstand (Metalloberfläche) von 10 cm zum Membranmodul und enthalten 48 piezoelektrische Wandlerelemente, die in das absolut dichte Edelstahlgehäuse eingebaut sind. Die Tauchschwinger haben Maße von 95 cm Länge, 29 cm Breite und 8 cm Dicke. Sie werden über eine Metallaufhängung in den Filtrationstank eingehängt. Jeder der beiden Tauchschwinger hat eine Leistung von 2000 Watt. Die Tauchschwinger der Fa. Elma Ultraschalltechnik (Singen, Htwl.) sind mit einem Generator verbunden, über den sie angesteuert werden. Hier kann die Leistung der Tauchschwinger eingestellt werden, wobei die Einstellung 100% einer Gesamtleistung beider Tauchschwinger von zusammen 4000 Watt entspricht. Die Wandler können mit einer Frequenz von 130 kHz oder auch 35 kHz betrieben werden. Zusätzlich kann ein sog. Sweep-mode eingestellt werden, der eine geringe Variation in der Frequenz bewirkt. Dadurch stehen etwaige Kavitationsblasen nicht dauerhaft an einer Stelle, sondern bewegen sich in einem bestimmten Bereich. Auch dies kann Erosionsschäden mindern.

Die Versuchsanlage wurde am Standort Biebesheim am Rhein auf dem Gelände der Rheinwasseraufbereitungsanlage des Wasserverbandes Hessisches Ried (Hessenwasser GmbH & Co KG) betrieben (Abb. 15). Dieser Standort hatte mehrere Vorteile. So war es möglich, neben dem Betrieb mit Original-Flusswasser aus dem Rhein auch voraufbereitetes Wasser der Biebesheimer Aufbereitungsanlage zu nutzen. Der Aufstellungsort im Gebäude ermöglichte einen problemlosen und frostfreien Betrieb. Auch technischer Support war hier gegeben.

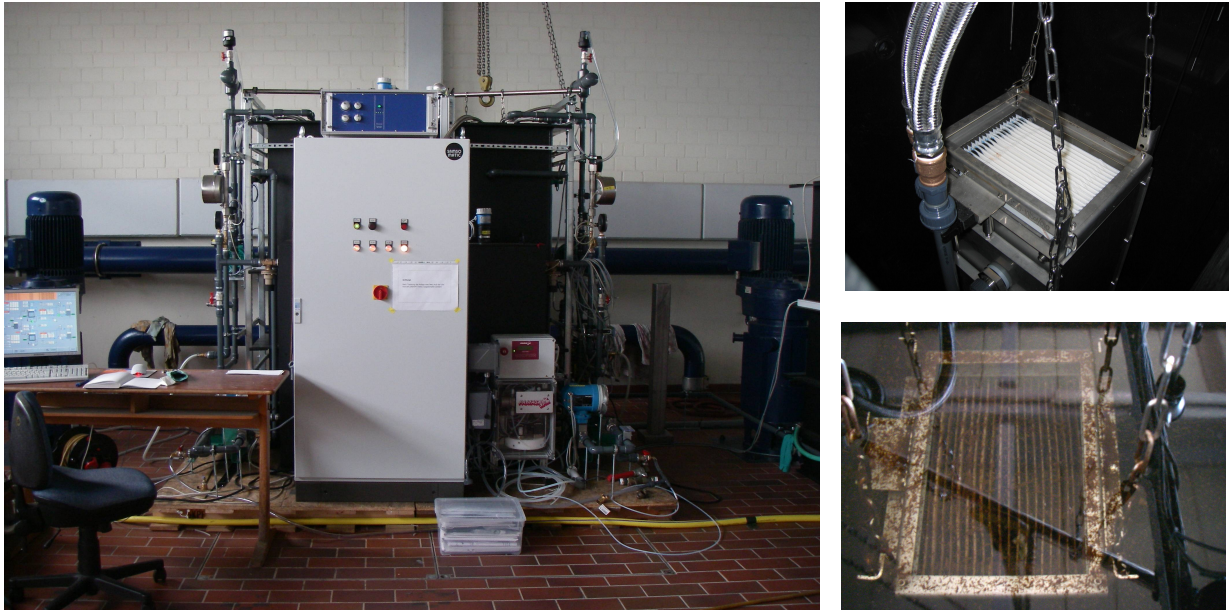


Abbildung 15: Die Versuchsanlage am Standort Biebesheim.

Oben rechts: ein neues Membranmodul nebst Anschlüssen als getauchtes Modul, eingehängt in den Filtrationstank.

Unten rechts: das Membranmodul und die von ihm abgetrennten Rückstände (hier vorwiegend Flockungsmittel)

Zur Integritätsüberwachung der Membran wurde zum einen das Trübungsmessgerät „Ultraturb“ der Fa. Lange eingesetzt, welches Trübungsmessungen im Streulichtverfahren gemäß ISO 7027 ausführt und das Ergebnis in FNU (Formazin Nephelometric Units) auf vier Nachkommastellen einstellbar ausgibt. Zum anderen wurde das Partikelzählgerät „Arti“ der Fa. Hach-Lange verwendet, welches die Partikel im Ablauf misst und die Partikelzahlen pro ml in verschiedenen Größenbereichen angibt. So ist dieses Gerät in der Lage, gleichzeitig verschiedene Partikelgrößen zu messen, die in acht Kanälen nach der Größenordnung aufgeteilt, wiedergegeben werden können. Über die Steuerung der Fa. Samsomatic (Frankfurt) kann die Anlage vollständig automatisiert gesteuert und alle Parameter können je nach Versuchslauf eingestellt werden. Sicherheitsabschaltungen dienen dem Schutz der Membranen, wie bei maximalem Unterdruck während des Filtrationsbetriebes oder maximalem Überdruck während des Rückspülprozesses, der gerade hier durch Aufblähen der Membrantaschen zum Platzen der Schweißnähte führen könnte. Für den Betrieb der Anlage kann über die Steuerung entweder ein konstanter Filtratfluss oder auch ein konstanter Unterdruck während der Filtrationsphase vorgegeben werden. Die Daten werden kontinuierlich aufgezeichnet und im Computer archiviert. Neben Druck- und Durchflussdaten sind dies auch Trübungswerte und Temperaturdaten. Jede Sekunde wird ein Datensatz aufgezeichnet. Neben den Druckaufnehmern, die die Werte an die Steuerung übermitteln, ist die Anlage zur Sichtkontrolle zusätzlich mit zwei Manome-

tern an der Filtratleitung ausgestattet. Die Steuerung läuft auf Basis einer Simatic SPS7 Steuerung.

Der Vorlagentank dient dem Absetzen von etwaigem grobem Schmutz, der über einen Auslass im Tankboden abgeführt werden kann. Weiterhin dienen Vorfilter aus einem Kunststoffgewebe mit einer Durchlassweite von  $95\ \mu\text{m}$ , wie sie auch in Hausanlagen angetroffen werden, dazu, Bestandteile, die größer sind, zurückzuhalten, um damit die empfindlichen Membranen vor groben Partikeln zu schützen und nicht unnötig zu belasten.

Die entsprechende Leistungsauslegung und der Abstand der Tauchschwinger zur Membran, wie auch die Frequenzen wurden nach Vorversuchen der Fa. Elma entsprechend ausgewählt und in der Versuchsanlage realisiert. Abbildung 16 zeigt eine Schemazeichnung dieser Versuchsanlage.

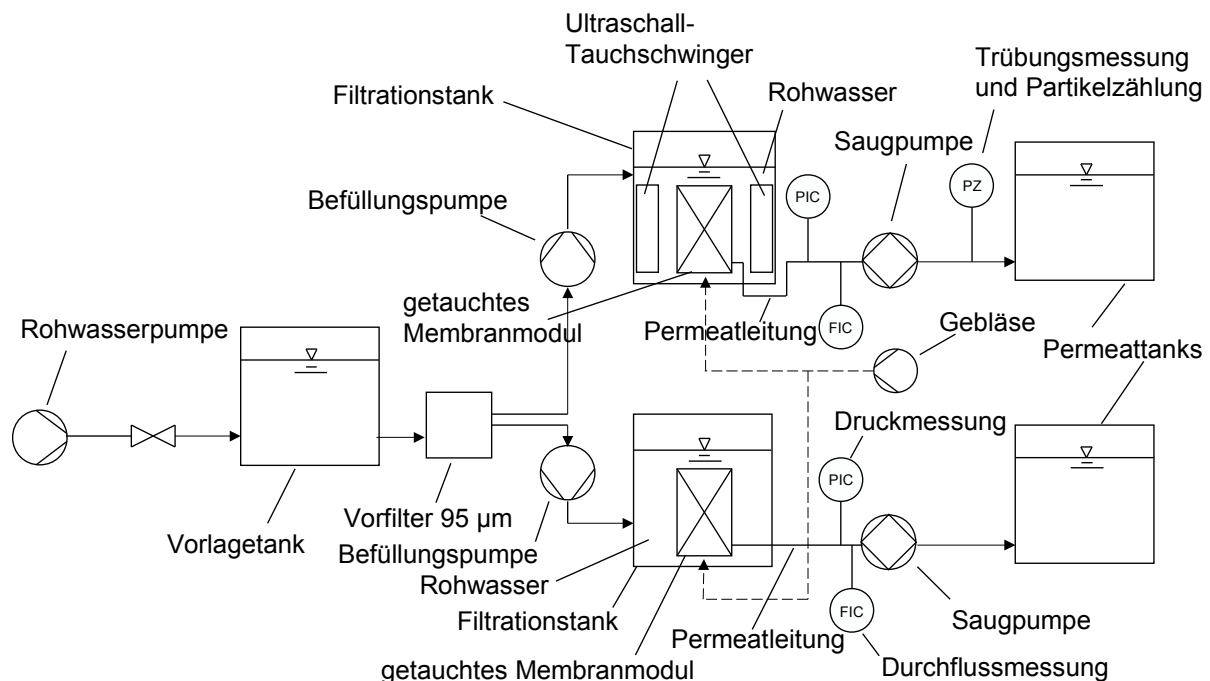


Abbildung 16: Aufbau der Versuchsanlage

Bei den Vorversuchen war für die Fa. Elma die Frage zu lösen, welche Frequenz und Leistung noch eine Abreinigung der Membranoberfläche bewirkt, aber bei dauerhaftem Betrieb nicht zu einer Schädigung derselben führt. Die Versuche wurden hier mit einzelnen in einen Rahmen eingespannten Membranstücken im Labormaßstab durchgeführt, nicht mit kompletten Modulen. Dazu wurden Versuche mit neuen Membranstücken, wie auch mit verschmutzten Stücken bei  $35\ \text{kHz}$  und bei  $130\ \text{kHz}$  durchgeführt. Bei  $35\ \text{kHz}$  und einer Beschallungsdauer von einigen Stunden mit einer Flächenleistungsdichte des Ultraschalls ( $I$ ) von  $2,9\ \text{W}_{\text{eff}}/\text{cm}^2$  waren im Mikroskop, wie auch im Durchlicht eines Projektors mit bloßem Auge Membranerstörungen (Lö-



cher) erkennbar, deren Anzahl mit zunehmender Beschallungsdauer weiter zunahm. Bei 130 kHz mit gleicher Flächenleistungsdichte hingegen waren auch nach einer Beschallungsdauer von 36 Stunden keine Membranzerstörungen sichtbar. Für beide Frequenzen liegt die Ultraschall-Leistungsdichte bei dieser Anwendung oberhalb der Schwelle für transiente Kavitation. Nach 360 min Ultraschalleinwirkung ist die Membran auch bei 130 kHz visuell betrachtet sauber (Doan und Jung, 2006).

## 4.2 Die Versuchsreihen

Bei der ersten Inbetriebnahme der zweistraßigen Membrananlage ging es zunächst um den Vergleich beider Membranmodule, damit bei den Versuchsreihen mit Ultraschall die Effekte eindeutig zugeordnet werden können. Dazu müssen beide Membranmodule vorab mit dem gleichen Rohwasser die gleichen Unterdruck- bzw. Permeabilitätswerte zeigen. Sollte dies nicht der Fall sein, muß die Differenz beachtet werden. Die Leistungsfähigkeit der Membranen ist zu testen, und es müssen ein geeigneter Filtrationszyklus und eine sinnvolle Betriebsweise ausgewählt werden. Hiermit wird eine möglichst optimale Betriebsweise für die Membran ermittelt, bevor zusätzliche Reinigungsmechanismen eingesetzt werden.

Der Filtrationszyklus besteht aus einer **Filtrationsphase**, bei der durch Unterdruck mittels Saugpumpen das Permeat auf der Innenseite der Membrantaschen abgezogen wird. Dabei werden die Schmutzpartikel auf der Oberseite der Membran zurückgehalten. Nach Angabe des Membranherstellers sollte der Unterdruck der Membran nicht mehr als 500 mbar betragen. Dem ist bei der Einstellung des spezifischen Membranflusses in  $L/(m^2 \cdot h)$  Rechnung zu tragen. Danach erfolgt eine **Umschaltphase** von Filtration auf Rückspülung. In dieser Zeit „ruht“ die Membran, d.h. es erfolgt keinerlei Membranfluss. Dies dient der Membranentspannung, damit die durch die Umkehr der Filtrationsrichtung bedingte mechanische Belastung der Membranen minimiert wird. Vom Hersteller werden dafür 2 min empfohlen. Danach erfolgt die **Rückspülphase**, bei der von der Permeatseite her Permeat mit Überdruck durch die Membran gepumpt wird. Dadurch soll der während der Filtrationsphase auf der Membran entstandene Belag von deren Oberfläche abgelöst werden. Da es sich hier um verschweißte Membrantaschen handelt, darf der Überdruck nur minimal sein, sonst würden die Membrantaschen platzen. Nach Angabe des Herstellers dürfen 200 mbar nicht überschritten werden. Zur Absicherung wurde in der Steuerung dieser Grenzwert eingegeben und darüber hinaus ein Überdruckventil montiert. Danach erfolgt eine weitere Umschaltphase analog zu der oben genannten, bevor die nächste Filtrationsphase einsetzt.

#### 4.2.1 Inbetriebnahme, die Wirkung von Spülluft

Bei der Inbetriebnahme wurde vorgereinigtes Wasser der Rheinwasseraufbereitungsanlage Biebesheim verwendet. Die Vorreinigungsschritte umfassen, nach der Entnahme des Rohwassers aus der fließenden Welle, eine Grobsiebung, Vorozonung, Fällung und Flockung mit dem Flockungsmittel Eisen-III-Chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) und Zusatz von Polyelektrolyt als Flockungshilfsmittel sowie Sedimentation. Nach dieser Behandlung hat das Wasser Trübungswerte von etwa 0,2-0,4 FNU.

Die Inbetriebnahme der Membranen erfolgte schrittweise gemäß Vorgabe des Herstellers. Somit wurde mit einem spezifischen Membranfluss von  $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  begonnen und dieser am nächsten Tag auf  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  gesteigert. Die Befüllung des Filtrationstanks erfolgte diskontinuierlich. Bedingt durch diese geringen Abweichungen in der Füllhöhe ergab sich eine Druckdifferenz von 10 mbar bei den Unterdruckwerten im Saugbetrieb. Die im Filtrationstank zurückgehaltenen Partikel wurden in dieser Versuchsphase aufkonzentriert. Daher musste der Filtrationstank zuweilen entleert werden. Die zurückgehaltenen Partikel bestanden im Wesentlichen aus den Rückständen des rostbraunen Eisenflockungsmittels (Abb. 15 unten rechts). Durch die kräftige Färbung ist auch visuell eine abgereinigte und eine belegte Membranfläche sehr gut zu unterscheiden. Der gewählte Filtrationszyklus zu diesem Zeitpunkt betrug in der Gesamtdauer 36 min, unterteilt in 30 min Filtrationsphase, jeweils 2 min Umschaltphase und 2 min Permeatrückspülphase. Eine Cross-flow-Überströmung mit Luft über die mittelblasigen Belüftungselemente am Fuß des Moduls während des Filtrationsbetriebes in 10 minütigem Abstand zeigte keinen erkennbaren Unterschied bei der transmembranen Druckdifferenz. Ein gezielter Einsatz der Luftblasenüberströmung per Handsteuerung nach 8-tägiger Betriebsdauer während der Rückspülphase zeigte mit einer um 50 mbar geringeren transmembranen Druckdifferenz (um  $1/3$  geringerer Unterdruck) eine deutliche Verbesserung. Daraufhin wurde die Luftblasenüberströmung während der Rückspülphase bei beiden Membranmodulen automatisiert. In Abbildung 17 sind durch die rote Linie die maximalen Unterdruckwerte während des Filtrationsprozesses markiert. Sie betragen etwa 150 mbar und bleiben konstant. Die Druckwerte bei der Filtration werden durch die Linien markiert, die mit „PIC“ bezeichnet sind.

Nach knapp 2 monatiger Betriebszeit wurden beide Membranen mit  $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  betrieben. Nach 10 Tagen Betriebsdauer kam es zum Ausfall der Spülluft. Hier zeigte sich deutlich, dass ohne Luftblasenüberströmung die Ablösung der Deckschicht in der Rückspülphase wenig effektiv ist. Das zeigt Abbildung 18, deren dicke rote Linie wie bei Abbildung 17 die maximalen Unterdruckwerte während des Filtrationsprozesses markiert. Sie fällt langsam ab, das heißt der Unterdruck nimmt über die fünf Tage um etwa 50 mbar zu (-210 mbar nach -260 mbar). Es kam später zum Anlagenstillstand durch Erreichen des hier voreingestellten Maximalunterdruckes von 350 mbar.

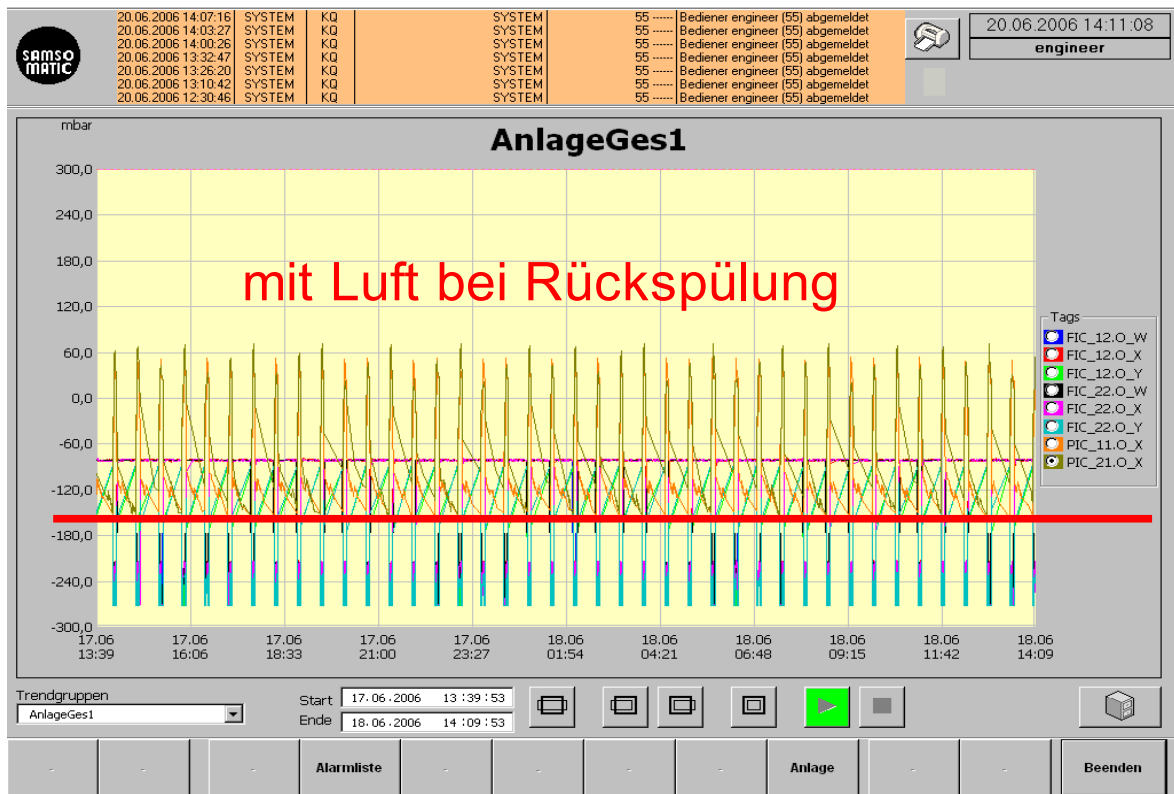


Abbildung 17: Der Betrieb beider Membranmodule mit Luftblasenüberströmung während der Rückspülung. Es stellen sich konstante Unterdruckwerte um 150 mbar ein (rote Linie).

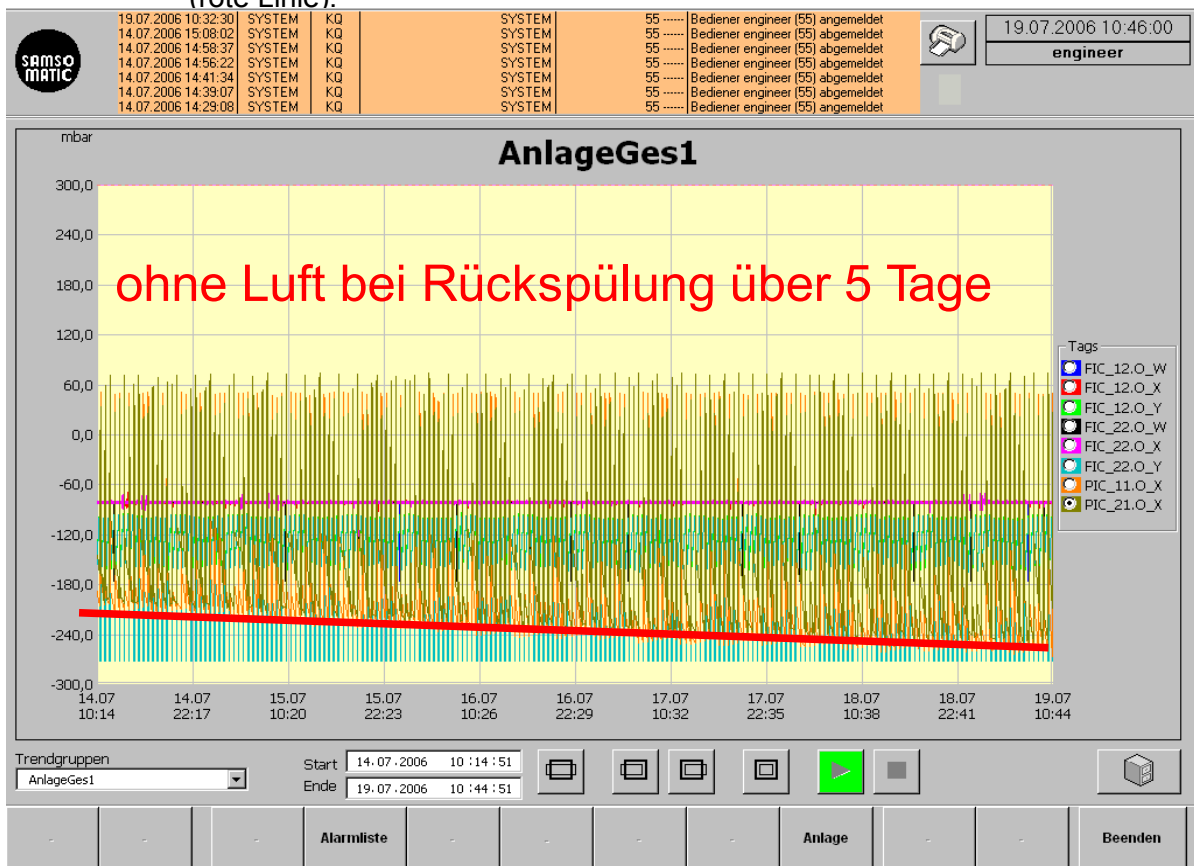


Abbildung 18: Der Betrieb ohne Luftblasenüberströmung beider Membranmodule. Es zeigt sich eine deutliche Zunahme des Unterdruckes (rote Linie).

#### 4.2.2 Erste Versuche mit Ultraschall

Die Inbetriebnahme der Ultraschall-Tauchschwinger erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Elma H. Schmidbauer GmbH & Co KG. Nach Feststellung der korrekten Funktion des Schallwandlers sowie des Generators wurden erste Testversuche mit Ultraschall vorgenommen. Diese wurden jeweils mit der Frequenz von 130 kHz mit 100% Leistung entsprechend 4000 Watt mit 2,1 Watt/cm<sup>2</sup> auf der Wandlerfläche und im sog. Sweep-mode durchgeführt. Es konnte durch Messung mit einem Kavimeter festgestellt werden, dass die Kavitationsschwelle beim Einsatz genannter Parameter überschritten wurde. Das Kavimeter misst dabei akustisch das Kavitationsrauschen, welches von kavitierenden Blasen herrührt.

Zunächst wurde der Ultraschall während der Filtrationsphase eingesetzt. Eine 10 minütige Beschallung bewirkte keinen sichtbaren Anstieg der Permeabilität, jedoch eine deutliche Verschlechterung der Trübungswerte beim Permeat von 0,035 FNU auf 0,13 FNU. Bei Wiederholung des Versuchs mit 5 minütiger Beschallung stieg die Permeattrübung auf 0,2 FNU an. Bei weiterer Filtration ohne Ultraschall sanken die Trübungswerte jedoch wieder ab.

Um diesen Effekt zu deuten, kann die Membran mit einem Sieb verglichen werden. Liegen beispielsweise Erdkrümel auf einem Sieb, welches parallel zur Erdoberfläche angeordnet ist, sollten sie durch die Gravitationskraft hindurchfallen. Dies tun sie aber nur bedingt, da sie sich zum Teil gegenseitig blockieren. Wird das Sieb nun waagrecht hin- und herbewegt bewegt, fallen die Erdkrümel vermehrt hindurch, da durch das Stoßen die gegenseitige Aneinanderlagerung aufgehoben wird.

Da der Ultraschall parallel zu den Membranflächen eingestrahlt wird (Abb. 13), bewirkt dieser, dass sich durch die Dichte- und Dehnungswellen in der den Schall übertragenden Materie (hier Wasser) auf der Membranoberfläche eine Hin- und Herbewegung erzeugt wird. Dadurch werden Partikel mobilisiert, die durch die Sogwirkung des erzeugten Unterdrucks vermehrt durch die Membran befördert werden können. Während der Filtrationspausen eingesetzter Ultraschall zeigte keinen signifikanten Effekt.

Während der Permeatrückspülung eingesetzter Ultraschall über die gesamte Rückspüldauer von 2 min zeigte bei wieder einsetzender Filtrationsphase eine geringe Erhöhung der Permeabilität, aber damit einhergehend auch hier erhöhte Trübungswerte, die langsam wieder absanken.

### 4.2.3 Versuche mit Ultraschall beim Rückspülprozess – Das USL-Verfahren

Nach den ersten Einzelversuchen erfolgten zur genaueren Untersuchung kontinuierliche Handversuche in Reihe. Hier wurde z.B. der 1 minütige Ultraschalleinsatz während der Rückspülung in vier aufeinanderfolgenden Rückspülungen im Filtrationszyklus untersucht. Das Ergebnis zeigte keine signifikante Verbesserung der Permeabilität. Die Trübungswerte waren bei einsetzender Filtration hoch, sanken jedoch im Laufe der Filtration wieder ab.

Es ließ sich beobachten, dass der Filtrationsbeginn nach der ersten Rückspülung mit Ultraschall mit 0,28 FNU eine deutlich höhere Trübung aufwies als nach der vierten Rückspülung mit Ultraschall mit nur 0,074 FNU. Nach weiteren Rückspülungen mit Ultraschall wurden 0,053 FNU, im Verlauf der Filtration nach weiteren Beschallungen 0,039 FNU erreicht.

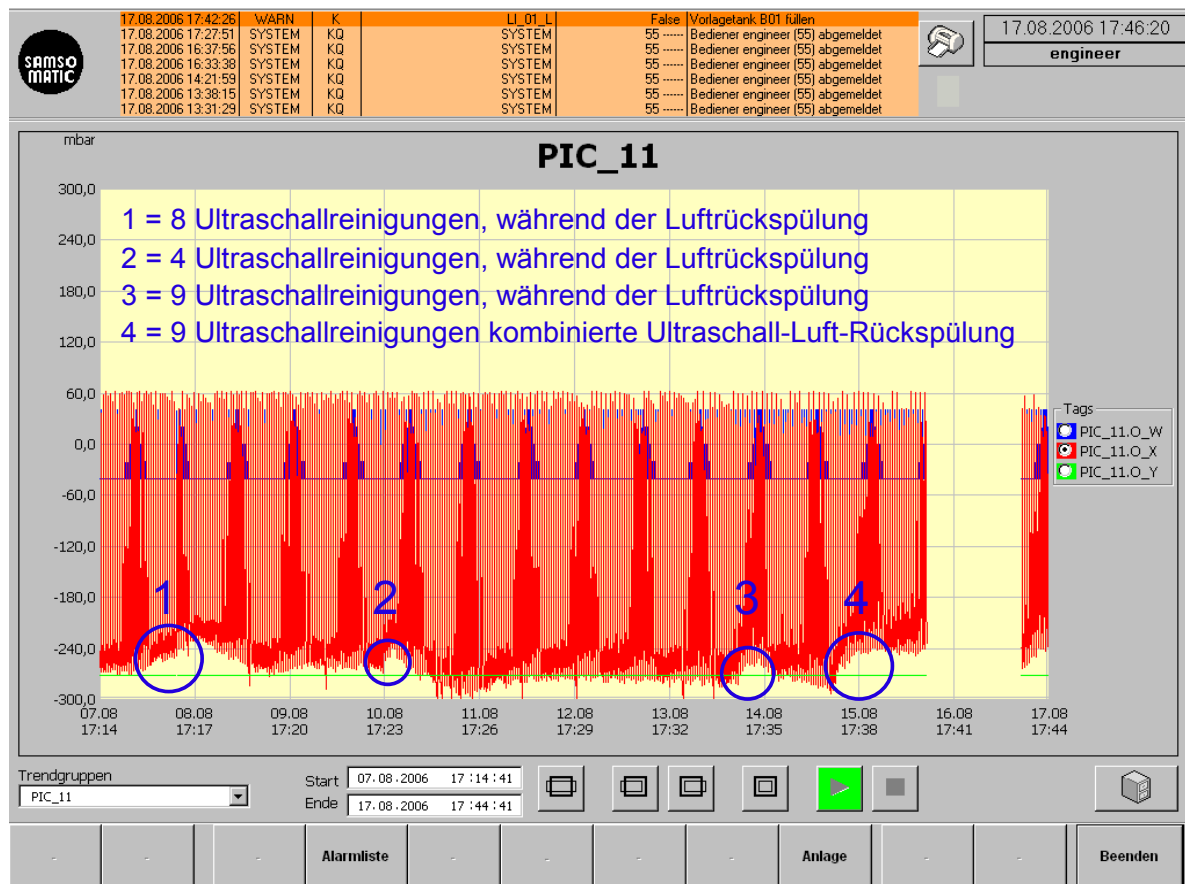


Abbildung 19: Ultraschallreinigung mit gleichzeitiger Luftrückspülung und im kombinierten Verfahren nacheinander geschaltet.

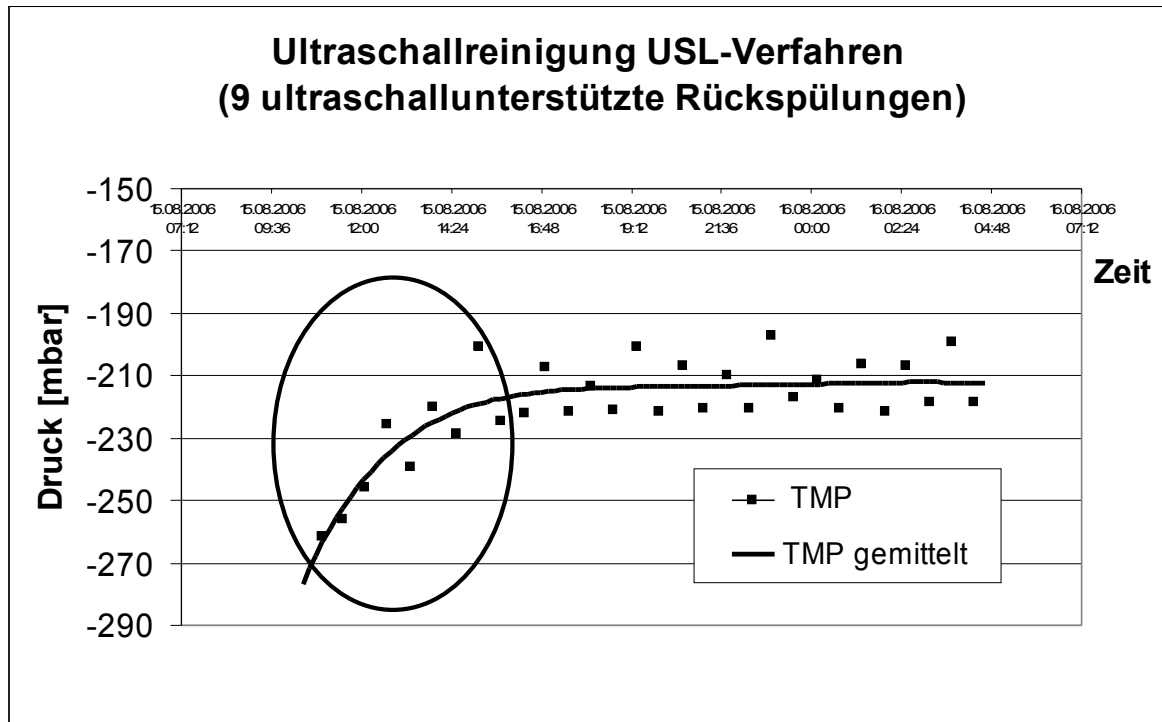


Abbildung 20: Erster Handversuch mit dem kombinierten Ultraschall-Luft-Rückspülverfahren (kurz: USL-Verfahren). Die Druckwerte entsprechen Punkt 4 aus Abb. 19.

Während der Behandlung der Linie 1 nur mit Ultraschall und ohne Spülluft lief die parallel betriebene Linie 2 statt mit Ultraschall mit Spülluft und zeigte eine höhere Permeabilität.

Nachfolgend wurden beide Linien wieder kontinuierlich mit Luftblasenüberströmung in der Rückspülphase betrieben. Im Folgenden zeigte die Linie 1 bessere Permeabilitätswerte, auch zwei Tage später bei unverändertem Betrieb, also auch ohne weiteren Einsatz von Ultraschall.

In den darauffolgenden Versuchen wurde während der Rückspülphase bei gleichzeitiger Luftblasenüberströmung bei der Linie 1 zusätzlich Ultraschall (130 kHz, 4000 Watt, sweep mode) eingesetzt. Die gesamte Rückspüldauer von zwei Minuten wurde mit Luftblasen überströmt, aber nur eine Minute lang beschallt. Hier zeigten sich jeweils Verbesserungen beim TMP ohne eine deutliche Erhöhung der Trübung beim Permeat in darauffolgender Filtrationsphase. Wurde wieder ohne Ultraschallunterstützung und nur mit Luftblasenüberströmung rückgespült, erhöhte sich der TMP wieder auf die Werte vor der Behandlung (Abb. 19 Punkte 1-3).

Beim nächsten Versuch wurde während der ersten Minute der Rückspüldauer anstelle der Luftblasenüberströmung mit Ultraschall (130 kHz, 4000 Watt, sweep mode) behandelt. Während der zweiten Minute Rückspüldauer wurde anstelle des Ultraschalls mit Luftblasen überströmt (Abb. 19 Punkt 4). Diese Variante, die im Nachfolgenden auch als kombiniertes Ultraschall-Luft-Rückspülverfahren (Kurz: USL-Verfahren)

ren) bezeichnet wird, zeigte eine deutlichere und auch nachhaltigere Verbesserung des TMP (Abb. 20). Im Verlauf der Filtration wurden deutlich verbesserte Trübungswerte festgestellt.

Es handelt sich hier aber um eine deckschichtkontrollierte Filtration, denn die aus Flockungsmittelrückständen gebildete Deckschicht wurde nicht vollständig entfernt. Erwähnt werden muss auch, dass die Flockungsmittelrückstände im Filtrationstank der mit Ultraschall behandelten Membran im Vergleich zu denen im Filtrationstank der ohne Ultraschall behandelten Membran deutlich sichtbar dispergiert wurden.

Bei nachfolgendem, dauerhaftem Betrieb nur mit Luftblasenüberströmung nahm der TMP über die Dauer wieder leicht zu, wie beim Betrieb der Membranen zuvor. Der erneute Versuch mit dem kombinierten Verfahren (nicht abgebildet) zeigte wieder eine deutliche Verringerung des TMP, einhergehend mit gleichzeitiger Verbesserung der Trübungswerte bei darauf folgender Filtration.

#### **4.2.4 Versuchsreihe 1: Einsatz von 130 kHz Ultraschall und vorgereinigtem Rohwasser mit steigender Konzentration im Filtrationstank**

Die Integration der Ultraschall-Tauchschwinger und des Generators in die automatisierte Steuerung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Samsomatic. Damit war es möglich, die Anlage im Dauerbetrieb und mit ultraschallunterstützter Reinigung laufen zu lassen.

Der Versuch lief über 16 Tage, in denen die Anlage kontinuierlich zweistraßig lief. Die Membranen der Linie 1 wurden dabei mit Ultraschall im kombinierten Ultraschall-Luft-Rückspülverfahren behandelt, die Membranen der Linie 2 hingegen nur mit Luftblasenüberströmung während der Rückspülung. Die zurückgehaltenen Bestandteile des vorgereinigten Rohwassers bestanden im Wesentlichen aus eisenhaltigen, rostbraunen Flockungsmittel-Rückständen. Diese konzentrierten sich im Filtrationstank kontinuierlich auf, da kein Konzentrat abgezogen wurde und bei dieser Versuchsreihe auch kein Überlauf erfolgte.

Der spezifische Membranfluss beider Membranmodule betrug  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  die Filtrationsdauer 30 Minuten mit jeweils 2 Minuten Entspannungsphase und einer Permeatrückspüldauer von 2 Minuten. Die Permeatrückspülung erfolgte mit  $60 \text{ L/h}$  für jedes Membranmodul, d.h. mit  $6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ .

Der Ultraschall der Linie 1 wurde in der ersten Minute während der Rückspülung eingesetzt und zwar mit den Parametern Frequenz 130 kHz, 100% Leistung entsprechend 4000 Watt und im sweep-mode. Die Luftblasenüberströmung erfolgte anschließend während der zweiten Minute der Rückspülphase bei abgeschaltetem Ultraschall.

Zum Vergleich beider Linien wurden die Werte der Permeabilität über die Zeit aufgetragen, in den Originalwerten, wie auch als normierte Werte (Abb. 21).

Im direkten Vergleich mit der Linie 1 fällt die Linie 2 bereits nach 17 h wegen Erreichens des voreingestellten  $p_{max}$  von -400 mbar aus.

Linie 1 mit Ultraschall-Behandlung im USL-Verfahren läuft jedoch mit nur geringer Permeabilitätsabnahme kontinuierlich weiter. Nach einer Entspannungsphase der Membran der Linie 2 von 11 Tagen wird diese wieder in Betrieb genommen, fällt aber trotz geringerer Aufkonzentration der Flockungsmittelrückstände gegenüber der Membran der Linie 1 nach 25 h wegen Erreichung des voreingestellten Maximalunterdrucks wieder aus.

Linie 1 mit USL-Verfahren läuft hingegen 16 Tage kontinuierlich durch und fällt erst dann wegen Erreichung des Maximalunterdruckes aus. Dies ist bedingt durch die stetige Aufkonzentration der Flockungsmittelrückstände im Filtrationstank und geht hier auch mit einem Abfall der Rohwassertemperatur und damit verbunden erhöhter Viskosität des Wassers einher.

Den 16 Tage dauernden Versuchslauf zeigt die Grafik in Abbildung 21. Die Original-Werte sind jeweils zusätzlich auf 20 °C normiert dargestellt. Dies führt aber nur zu einer geringen Abweichung, da die Temperaturdifferenz in diesem Fall relativ gering ist.

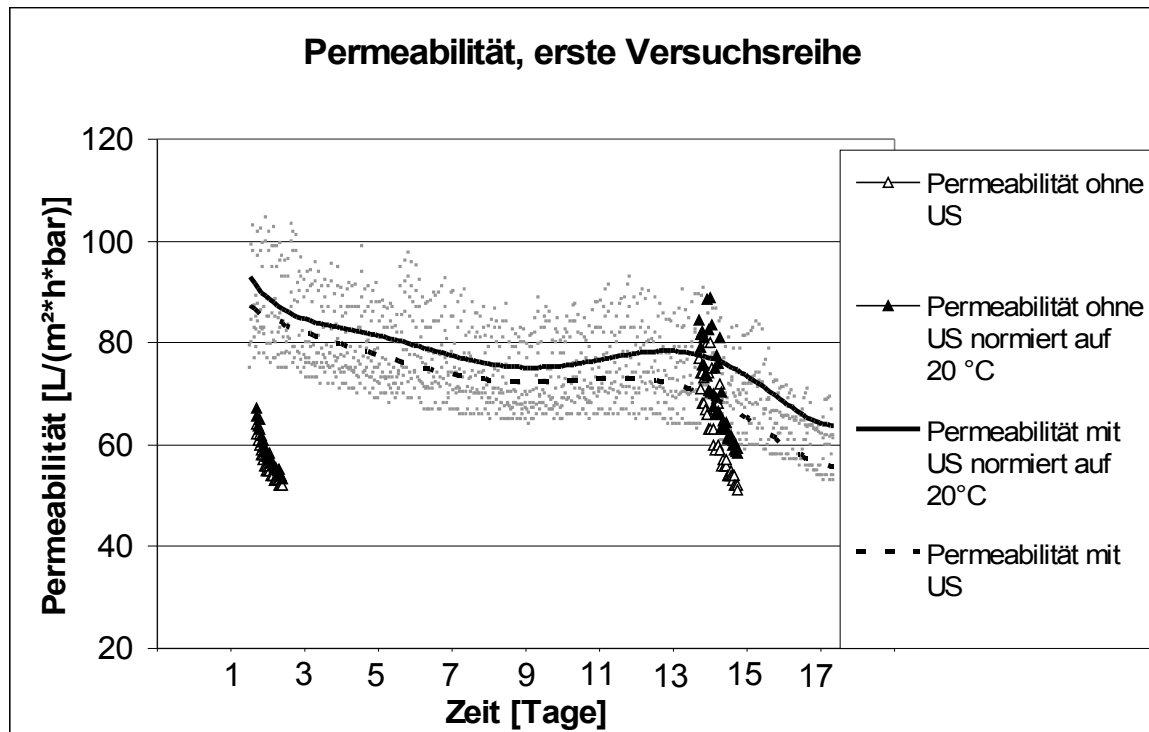


Abbildung 21: Die mit USL-Verfahren betriebene Linie 1 läuft über 16 Tage konstant durch, während Linie 2 (ohne Ultraschall) immer wieder in kurzer Zeit ausfällt.



Insgesamt zeigt sich schon hier bei der Permeabilität, unter diesen Vergleichsbedingungen, eine deutliche Überlegenheit des USL-Verfahrens gegenüber dem anderen Verfahren.

Eine wesentliche Frage ist, wie die Qualität des gewonnenen Permeates der Linie 1, die mit Ultraschall im USL-Verfahren behandelt wurde, aussieht. Dazu wurde gegen Ende der Versuchsreihe am 5.11.2006 eine Permeat-Probe entnommen und vom akkreditierten Zentrallabor der Hessenwasser GmbH & Co KG chemisch-mikrobiologisch untersucht. Die Probe zeigte keinerlei Keimbelastungen. Auch Eisen lag unter der Nachweisgrenze von 0,005 mg/l, obwohl die Konzentration an Flockungsmittel-Rückständen im Filtrationstank, also im zu filtrierenden Rohwasser, zu diesem Zeitpunkt am höchsten lag. Die Trübungswerte der mit Ultraschall behandelten Linie 1 lagen mit 0,02-0,03 FNU konstant niedrig und erfüllten damit die Anforderungen der Trinkwasserverordnung (Untersuchungsergebnisse im Anhang).

Somit lässt sich feststellen, dass es bei diesem Verfahren zu keinerlei Schädigung der Membranen kam, also weder zu einer Lochbildung noch zu einer Verminderung der Rückhaltefähigkeit der Membran.

Nachfolgend wurden beide Membranmodule manuell mit Wasserstrahl abgereinigt. Hierbei wurde die im Verlauf der Versuche gebildete Deckschicht entfernt und die Membranen damit für die neuen Versuchsreihen vorbereitet. Es war feststellbar, dass sich die Deckschicht des Membranmoduls der mit Ultraschall behandelten Linie 1 deutlich leichter ablöste und entfernen ließ, während die Deckschicht der Linie 2 schwerer zu entfernen war und zusätzliche Abreibung zu ihrer vollständigen Entfernung benötigte. Bei nachfolgender Inbetriebnahme liefen beide Membranen wieder annähernd im gleichen Unterdruck. Dies weist darauf hin, dass die Abnahme der Permeabilität bei den betriebenen Membranen vorwiegend durch Deckschichtbildung bedingt ist und weniger durch Porenverblockung. Der minimale Unterschied könnte durch eine Porenverblockung bei der nicht mit Ultraschall behandelten Membran gegeben sein. Die durch Ultraschalleinsatz verbesserte Permeabilität ist also hauptsächlich bedingt durch die Kontrolle der Deckschicht.

#### **4.2.5 Versuchsreihe 2: Einsatz von 130 kHz Ultraschall und vorgereinigtem Rohwasser mit gleichbleibender Konzentration im Filtrationstank**

Um zu sehen, wie sich die Membranmodule beider Linien verhalten, wenn bei gleichbleibender Konzentration filtriert wird, wurde die Anlage bis zu einer Konzentration der Flockungsmittelrückstände im Filtrationstank von 12 FNU betrieben. Anschließend wurde eine gleichbleibende Konzentration realisiert, indem der Vorlagetank über eine Anschlußleitung mit sauberem Trinkwasser befüllt wurde. Es sollte festge-

stellt werden, ob auch hier ein gleichmäßiger Permeabilitätsabfall stattfindet oder ob es möglich ist, die Membranen dauerhaft mit gleicher Permeabilität zu betreiben. Bereits nach 24 h zeigte die mit dem USL-Verfahren betriebene Linie eine um 82% höhere Permeabilität. Nach 13 Tagen Betriebszeit ergibt sich insgesamt eine um 96% höhere Permeabilität gegenüber der Referenzlinie ohne Ultraschallbehandlung. Bei den verglichenen Werten handelt es sich jeweils um die auf 20°C normierten Werte.

In der Grafik (Abb. 22) ist erkennbar, dass die Permeabilität der mit Ultraschall behandelten Linie etwa doppelt so hoch ist, wie die der Referenzlinie ohne Ultraschall. Ferner zeigt die Permeabilität der Linie mit Ultraschall leichte Schwankungen. Dies ist vermutlich bedingt durch eine ungleichmäßige Ablösung von Deckschichtbruchstücken. Bei einer Rückspülung lösen sich beispielsweise größere Deckschichtbruchstücke ab als bei einer anderen, somit ergeben sich dabei unterschiedliche Permeabilitätswerte.

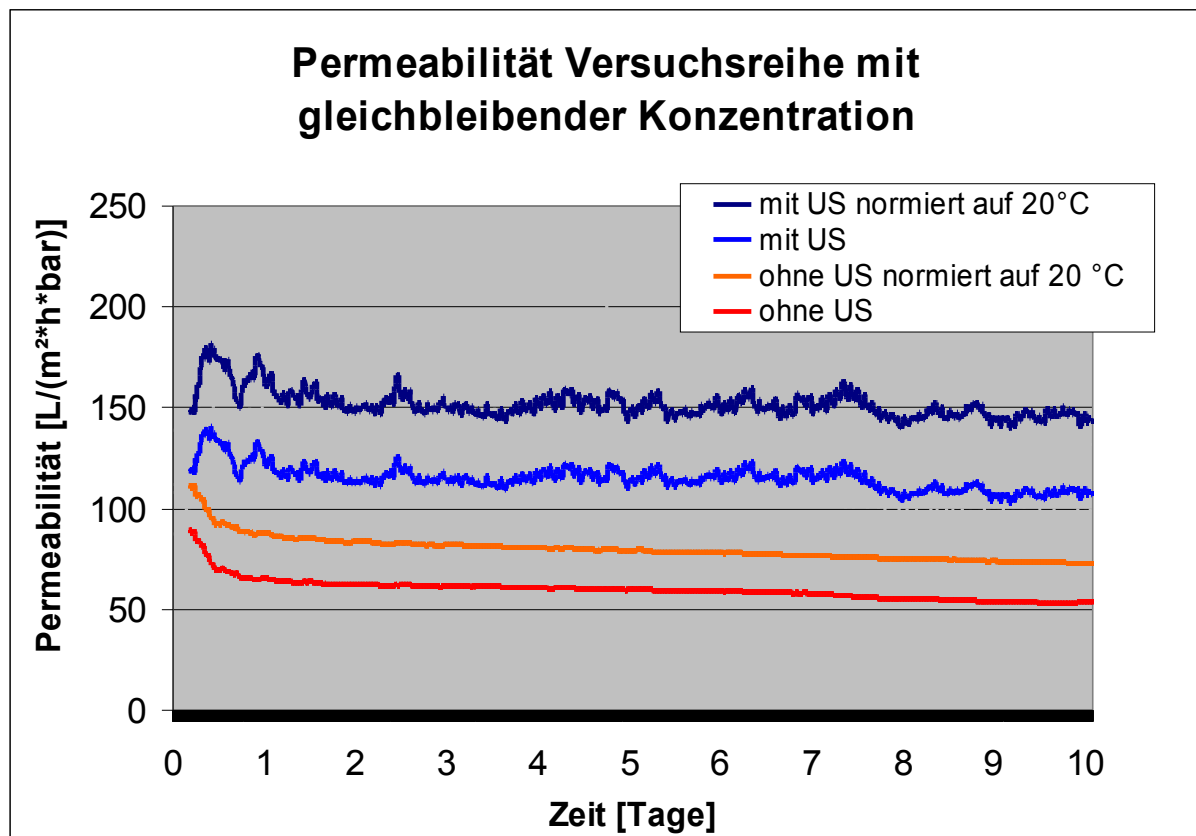


Abbildung 22: Vergleich der Permeabilität der Linie mit USL-Verfahren mit der Linie ohne Ultraschalleinsatz während der Versuchsreihe 2.

Die gesamte Laufzeit dieses Versuches belief sich auf 32 Tage.

Mit Hilfe von Ultraschall im hier angewendeten USL-Verfahren kann die Leistung der Membran im Hinblick auf die Permeabilität etwa verdoppelt werden.

Wie die Grafik zur Trübungsmessung (Abb. 23) zeigt, spiegeln sich die Schwankungen bei der Permeabilität der mit USL-Verfahren behandelten Linie 1 (Abb. 22, blau) jedoch nicht in den Trübungswerten des Permeates wieder. Nach der Einfahrphase direkt nach erneuter Inbetriebnahme der Anlage bleiben die Werte gleichmäßig niedrig und liegen zwischen 0,02 und 0,03 FNU. Die kleinen Spitzen sind die Rückspülpeaks, die nach jeder Rückspülung bei Beginn der Filtration auftreten. Sie sind in den Partikelgrafiken noch besser erkennbar. Diese treten auch ohne Ultraschallbehandlung auf.

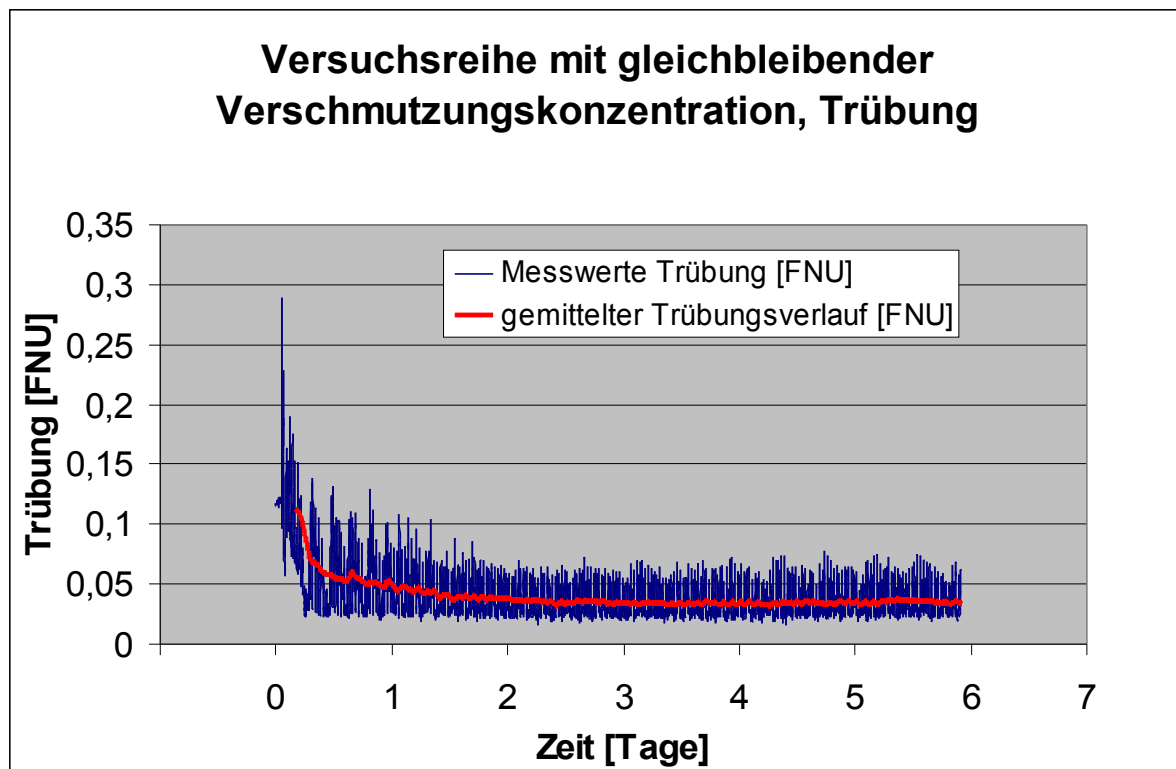


Abbildung 23: Verlauf der Trübungswerte der Linie mit USL-Verfahren während der Versuchsreihe 2.

Bei den Partikelzahlen lässt sich im Verlauf der Versuchsreihe mit Ultraschall sogar feststellen, dass sie abnehmen. Hieraus ist zu entnehmen, dass sich die Permeatqualität über die längere Dauer der Ultraschallanwendung verbessert. In Abbildung 24 ist erkennbar, dass sich die Rückspülpeaks innerhalb von 5 Tagen etwa halbiert haben. Sie zeigen eine Qualitätsverbesserung an. Gut erkennbar ist ebenfalls, dass die minimalen Partikelzahlen im Verlauf der Filtration mit zunehmender Dauer des Versuches deutlich niedrigere Werte annehmen.

Auch die Trübung erreicht am 3.3. Werte von 0,016 FNU im Permeatablauf. Am 16.3. liegen die Werte der besten Trübung während der Filtration bei vorher unerreichten 0,015 FNU (Abb. 25).

Zu bemerken ist, dass es sich auch hier um eine deckschichtkontrollierte Filtration handelt, auch wenn die Deckschicht, vorwiegend aus Eisen-III-Chlorid bestehend, sehr dünn ist.

Vermutlich tragen zwei Faktoren zur Qualitätsverbesserung bei. Zum Einen könnte es daran liegen, dass es sich um eine deckschichtkontrollierte Filtration handelt und die Partikel durch den Ultraschall dispergiert werden und damit eine feinporigere Deckschicht bilden, die den Rückhalt verstärkt. Zum Anderen kann es auch daran liegen, dass durch die Permeabilitätsverbesserung und damit einhergehend einem verringerten TMP die partikelanziehende Sogwirkung deutlich geringer ist. Wird dann über längere Zeit mit geringem Unterdruck filtriert, läuft das System konstant und besonders gleichmäßig. Wird dann mit besserer Wasserqualität rückgespült, werden auch die Rückspülpeaks geringer.

Diese entstehen, da zum Einen der Permeattank nicht ganz geschlossen ist und sich nach der Membran ein komplexes Rohrleitungssystem mit Ventilen befindet ebenso wie die Saugpumpe. In diesem System befinden sich immer Partikel. Wird nun rückgespült, bleiben Partikel auf der Membranrückseite hängen. Diese werden beim Anfahren der erneuten Filtration mit geringer Zeitverzögerung im Partikelzählgerät gemessen. Dass die Membran dicht ist, wurde auch mit Hilfe eines Blasentests überprüft. Die Membran wurde dabei rückseitig mit Luft beaufschlagt. Es traten keine Luftblasen aus. Mikrobiologische Proben waren einwandfrei. Zur Sicherheit sollte bei entsprechenden Anlagen auch immer das Rohrleitungssystem einschließlich Permeattank in geeigneten Abständen mit Druckstößen gereinigt bzw. desinfiziert werden. Somit konnte nicht nur nachgewiesen werden, dass bei dieser Art des Ultraschalleinsatzes die Membranen keinerlei Schädigung unterliegen, sondern sich eine Verbesserung der Permeatqualität einstellt.

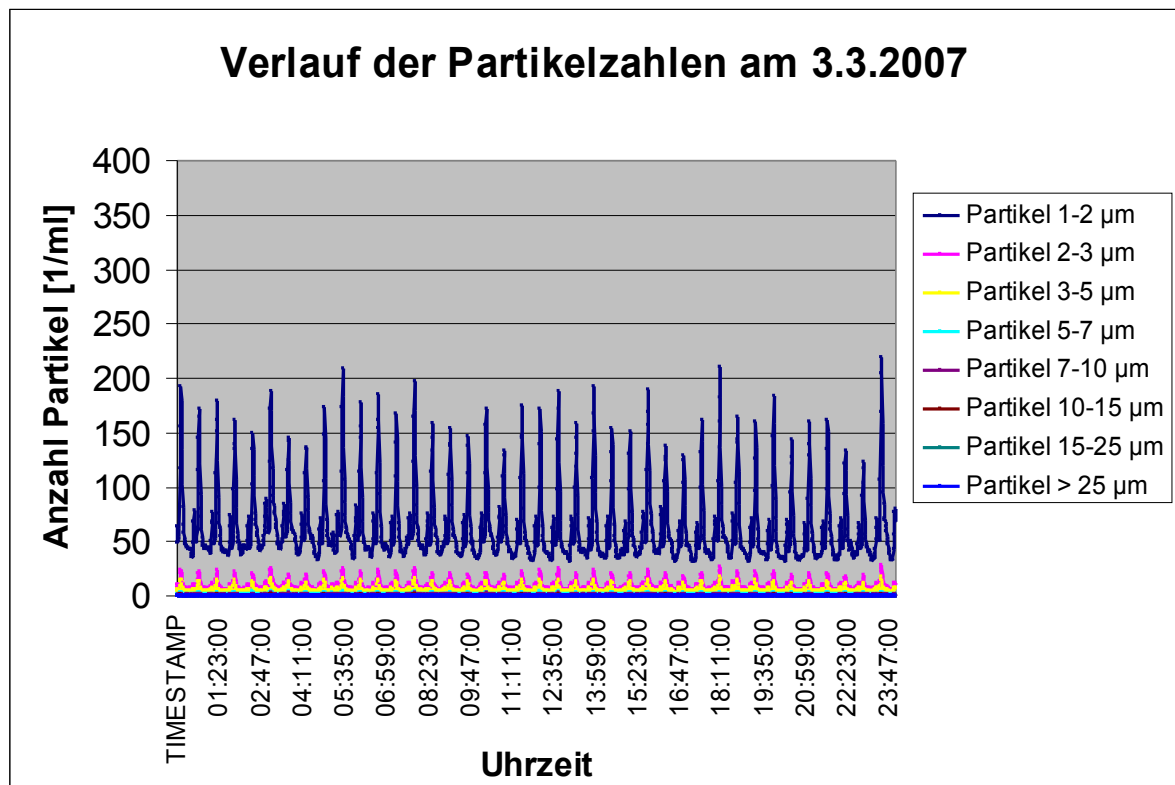
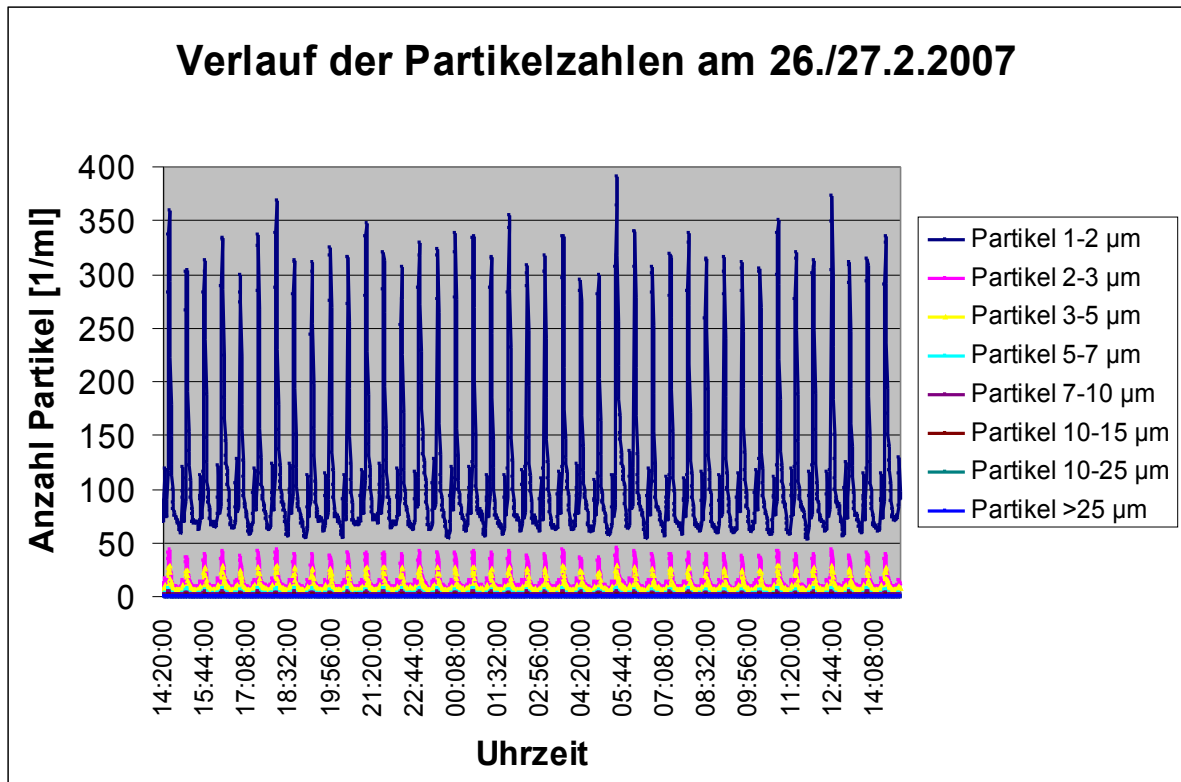


Abbildung 24: Verlauf der Partikelzahlen während des Versuchs  
oben: Partikelzahlen zu Beginn, unten: Partikelzahlen im Verlauf

Wählt man einen grafischen Ausschnitt von 6 h Versuchslaufzeit der Versuchsreihe am 16. 3. (Abb. 25) aus und betrachtet das Verhalten der transmembranen Druckdifferenz und die Trübungswerte in FNU zueinander, so ist erkennbar, dass verbesserte Trübungswerte mit geringeren transmembranen Druckdifferenzen zusammenfallen. Anders ausgedrückt, bei höherer Permeabilität sind die Trübungswerte geringer, was einer Verbesserung der erhaltenen Permeatqualität gleichkommt. Umgekehrt verschlechtert sich die Permeatqualität bei zunehmendem Unterdruck, also geringerer Permeabilität. Das unterstützt die obengenannte Vermutung, dass die Qualitätsverbesserung bei der mit Ultraschall betriebenen Linie bedingt ist durch den geringeren Unterdruck, mit dem sie läuft. Dadurch ergibt sich ein stabiler Betrieb, der die Partikel nur schwach gegen die Membran drückt. Erkennbar ist auch, dass ein etwas höherer Rückspüldruck mit zu einer verbesserten Reinigungsleistung beiträgt. Die Temperaturwerte waren für diesen Vergleichsbereich konstant.

Diese Beobachtungen zeigen, dass die ultraschallunterstützte Abreinigung insofern eine Qualitätsverbesserung bewirkt, als das eingesetzte Reinigungsverfahren zu einer deutlichen Permeabilitätserhöhung führt, die ihrerseits zu einer Permeatverbesserung beiträgt. Somit verbinden sich dabei zwei positive Effekte miteinander: Die Leistungsverbesserung der Membran hinsichtlich Durchsatz und Qualität des erhaltenen Produktes.

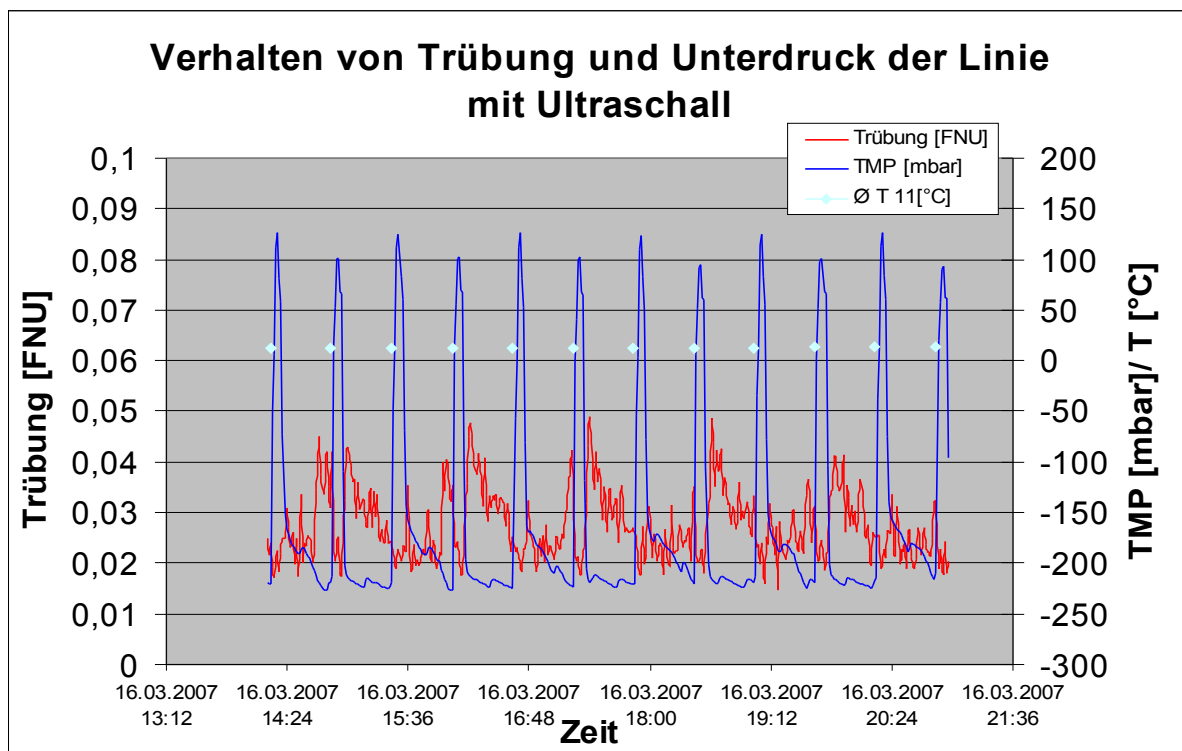


Abbildung 25: Ein Ausschnitt aus der Versuchsreihe zeigt, dass bei geringerem Unterdruck während der Filtration (Permeabilitätsverbesserung) die Trübung niedrigere Werte zeigt (Qualitätsverbesserung).

#### 4.2.6 Versuchsreihe 3: Einsatz von 35 kHz

Es konnte festgestellt werden, dass in einem kombinierten Verfahren mit 130 kHz sehr positive Reinigungsergebnisse erzielt werden. Nun stellt sich die Frage, welche Ergebnisse der Einsatz von 35 kHz bringt. Zu erwarten wäre eine durch die größeren Kavitationsblasen hervorgerufene, kräftigere Abreinigung, die aber mit einem höheren Erosionspotential für die Membran einhergehen würde: Also eventuell ein noch besseres Reinigungsergebnis, aber auch das Risiko die Membran zu schädigen. Frühere Forschungen hatten ergeben, dass mit niedrigeren Frequenzen bessere Reinigungsergebnisse erzielt werden.

Für die Versuche mit 35 kHz wurde jenes Membranmodul verwendet, welches ein Jahr lang ohne Ultraschall betrieben wurde. Diese Membran wurde zunächst 9 Tage mit dem kombinierten Verfahren und 130 kHz betrieben, wobei kein weiterer Permeabilitätsabfall zu verzeichnen war, aber auch keine signifikante Permeabilitätssteigerung (siehe Kap.4.2.8).

Um die Membran nicht möglicherweise gleich zu zerstören, wurde vorsichtig angefangen. Es wurden während des Rückspülprozesses 35 kHz eingestellt (bei dieser Frequenz sind im Gegensatz zu 130 kHz im Filtrationstank Kavitationsgeräusche hörbar, bedingt durch subharmonische Schwingungen, siehe auch Seite 29). Die Beschallung wurde mit 15 sec Einschaltverzögerung begonnen, und es wurde während der Rückspülung mit 50% Leistung, entsprechend 2000 Watt, 15 sec lang beschallt. Danach erfolgte, wie gewohnt, die Luftblasenüberströmung im Rückspülprozess. Ein Effekt der Permeabilitätsverbesserung war nicht erkennbar, nur eine Erhöhung der Rückspülpeaks. Im Verlauf der Filtration wurden jedoch wieder normale Trübungswerte erreicht.

Nun wurde ein 24 h Versuch mit 35 kHz, 20% Leistung entsprechend 800 Watt und 15 sec Dauer im kombinierten Rückspülverfahren, gestartet. Auch hier war eine sofortige Zunahme der transmembranen Druckdifferenz erkennbar, wenn 35 kHz statt 130 kHz eingesetzt wurden, also kein Reinigungseffekt.

Auch eine Erhöhung der Leistung und der Beschallungsdauer brachte keinen Reinigungseffekt, wie 6 Rückspülungen mit 35 kHz, 50% Leistung entsprechend 2000 Watt und 30 sec Rückspüldauer zeigten. Auch der 20 h Versuch mit selbiger Einstellung brachte kein anderes Resultat (Abb. 26). Ebenso ergab sich kein Reinigungseffekt mit 70% Leistung entsprechend 2800 Watt oder mit 100% Leistung entsprechend 4000 Watt in Kombination mit einer Beschallungsdauer von 30 sec.

Neben nicht vorhandenem Reinigungserfolg, sieht man aber einen deutlichen Effekt des Einsatzes von 35 kHz, nämlich sehr hohe Rückspülpeaks, deren Höhe offensichtlich proportional zur Leistung des eingesetzten Ultraschalls zunimmt (Abb. 27

und 28). Dass die Membranen trotz dieser Angriffe bei genannten Behandlungsdauern nicht nachhaltig geschädigt wurden, zeigt sich darin, dass bei Übergang zu einer Frequenz von 130 kHz wieder gute Trübungswerte erzielt werden und auch die Rückspülpeaks wieder die gleiche Höhe, wie vorher annehmen. Weiterhin erkennbar ist, dass auch während z.B. 20 h Dauerbehandlung mit 35 kHz im kombinierten Rückspülverfahren die Partikelzahlen während der Filtrationsphase immer wieder niedrigere Werte erreichen. Während die eingesetzte Ultraschall-Leistung sich direkt in der Höhe der Rückspülpeaks widerspiegelt, scheint die Beschallungsdauer in diesem Rahmen (15 sec bis 1 min) wenig Einfluss zu haben (Abb. 27 und 28). In Abbildung 28 erkennt man den nochmaligen Anstieg der Rückspülpeaks bei der Verdopplung der Leistung von 2000 Watt auf 4000 Watt verbunden mit der Frequenz von 35 kHz. Beim Einsatz von 130 kHz und einer Leistung von 4000 Watt werden die Partikelzahlen aber auch hier sofort wieder niedriger. Es hat keine irreversible Membranschädigung stattgefunden.

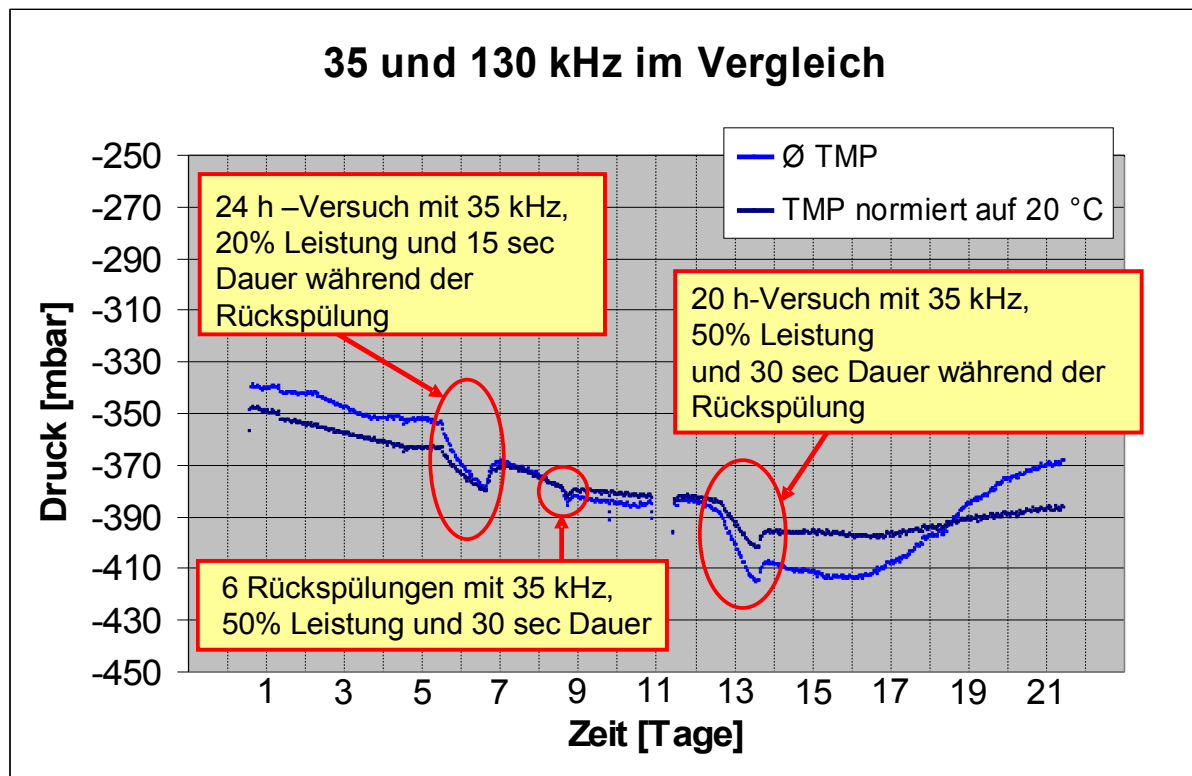


Abbildung 26: Der Abfall der transmembranen Druckdifferenz ist jeweils deutlich erkennbar, wenn anstelle von 130 kHz, 35 kHz eingesetzt werden



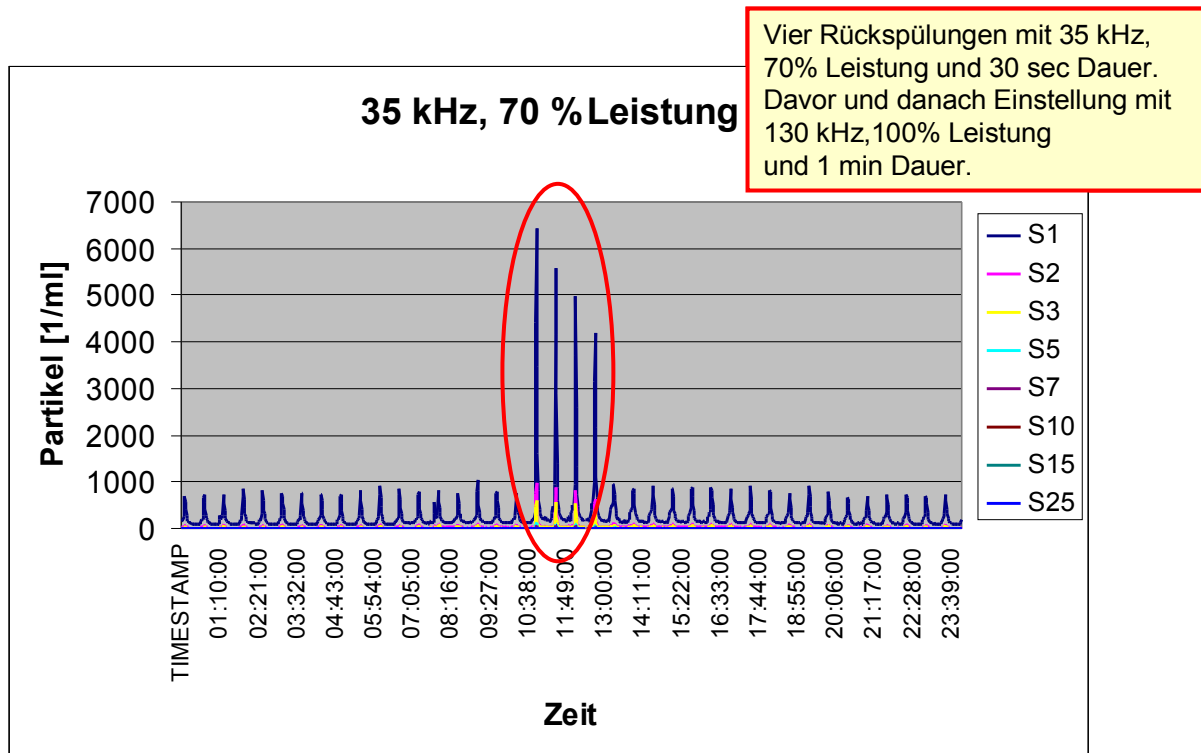


Abbildung 27: Die Rückspülpeaks bei kurzfristiger Beschallung mit 35 kHz und 2800 Watt (70 %) Leistung

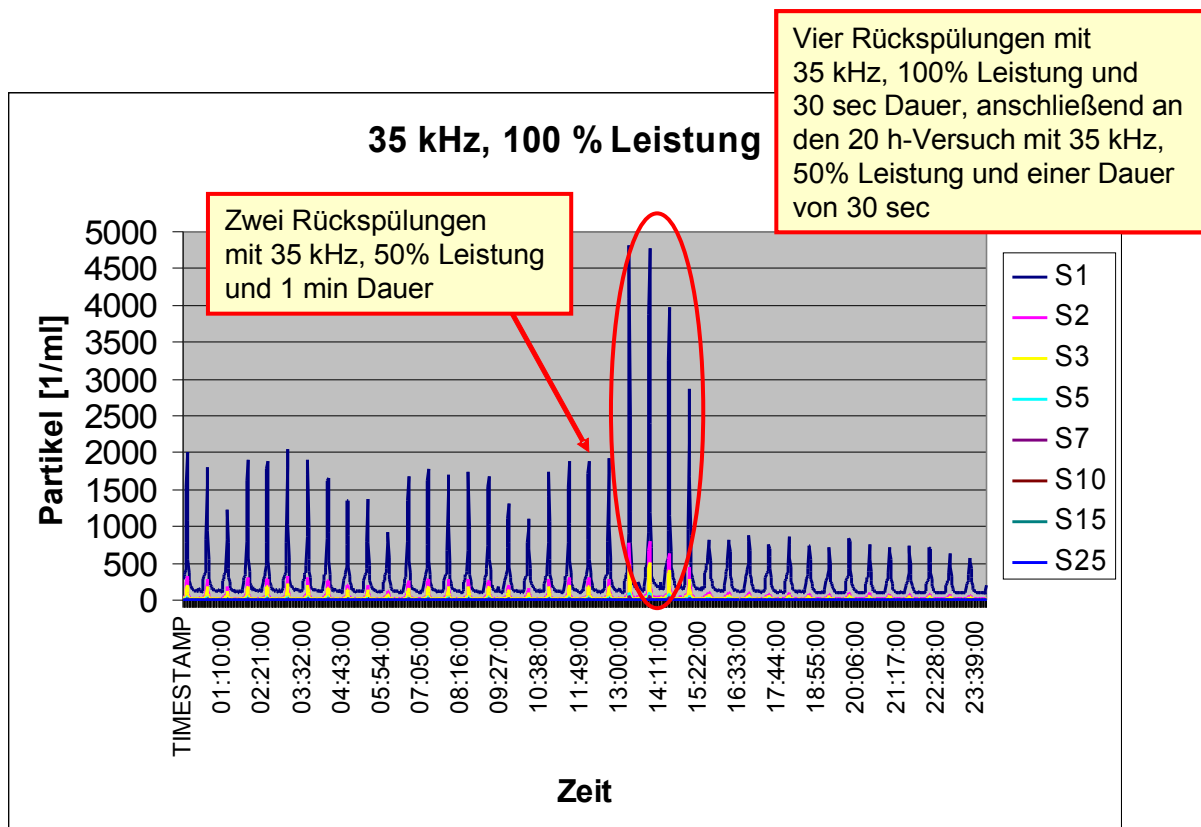


Abbildung 28: 20 h Versuch mit 35 kHz und 2000 Watt (50%) Leistung und Rückspülungen mit 35 kHz und 4000 Watt (100%) Leistung

Um die Frage zu beantworten, warum bei einer Frequenz von 130 kHz gute Reinigungsergebnisse erzielt werden, bei 35 kHz jedoch gar keins, wurde am Dritten Physikalischen Institut der Universität Göttingen die Versuchsanordnung in Anlehnung an die Versuchsanlage Biebesheim im Labormaßstab nachgebaut. Es wurden hier DIN-A4 große Membrantaschen verwendet, die aber den gleichen Abstand (1,25 cm) zueinander hatten.

Anhand einer Aufnahme in unverschmutztem Wasser konnte man die Verteilung der Kavitationsblasen, erkennbar als feine weiße Schleier, beobachten. Bei einer Frequenz von 130 kHz bilden sich Kavitationsblasenfelder genau in der Mitte zwischen den Membrantaschen aus. Bei 35 kHz ist nur ein Angriff der Kavitationsblasenfelder von außen auf die Membrantaschen zu sehen, sie gelangen nicht zwischen die Membrantaschen (Abb. 29).

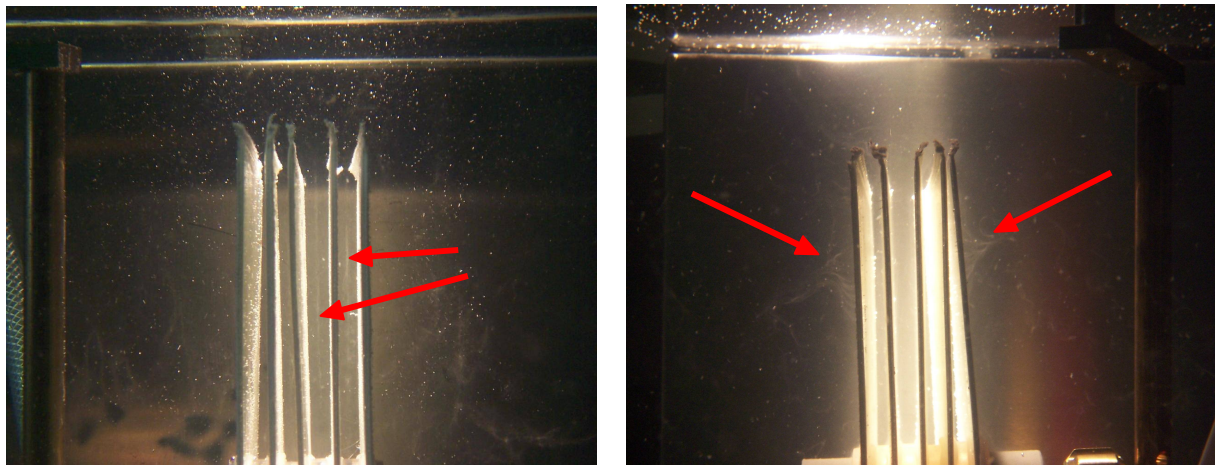


Abbildung 29: Versuchsaufbau im Labormaßstab.

Links: Beschallung der Membran mit 130 kHz, Kavitationsblasenschleier befinden sich zwischen den Membranen.

Rechts: Beschallung der Membran mit 35 kHz, keine Kavitationsblasenfelder zwischen den Membrantaschen, nur außerhalb.

(Abbildung Drittes Physikalisches Institut der Universität Göttingen 2007)

Die Begründung für dieses Verhalten findet sich in der Betrachtung der zu der Frequenz von 35 kHz bzw. 130 kHz gehörenden Schallwellenlänge  $\lambda$ . Hierbei muss  $\lambda/2$  klein genug sein, um zwischen die Membrantaschen zu passen (siehe auch Abb. 8).

Um die Frequenz zu berechnen, bei der  $\lambda/2$  klein genug ist, damit der Schall zwischen die Membrantaschen gelangen kann, was hier als Grenzfrequenz bezeichnet wird, kann folgende Formel genutzt werden:

$$f_c = c/(2d),$$

wobei

$f_c$  = Grenzfrequenz in kHz

$c$  = Schallgeschwindigkeit in Wasser in m/s

$d$  = Abstand der Membrantaschen in mm

Bei einer Wassertemperatur von 20 °C ist  $c = 1484$  m/s.

Der Abstand der Membrantaschen für die Versuchsanlage Biebesheim beträgt 12,5 mm. Daraus errechnet sich eine Grenzfrequenz von:

$$f_c = 1484 \text{ m/s} / (2 \cdot 12,5 \text{ mm}) = 59,36 \text{ kHz}$$

Somit müsste unter diesen Bedingungen bei rund 60 kHz noch ein Durchdringen der Membranzwischenräume mit Schall möglich sein und daher hier auch noch ein Abreinigungsergebnis.

Da sich die Schallgeschwindigkeit in Wasser mit der Temperatur ändert, ändert sich auch die Grenzfrequenz. Im Rahmen der Versuche wurde Wasser der Temperatur von 7°C bis 30°C filtriert. Um festzustellen, in welcher Größenordnung sich die Abweichungen bewegen, wird die Grenzfrequenz für 0°C und 30°C berechnet.

Schallgeschwindigkeit in Wasser bei 0°C = 1407 m/s

$$f_c = 1407 \text{ m/s} / 25 \text{ mm} = 56,28 \text{ kHz}$$

Schallgeschwindigkeit in Wasser bei 30 °C = 1509 m/s

$$f_c = 1509 \text{ m/s} / 25 \text{ mm} = 60,36 \text{ kHz}$$

Somit ergibt sich für den verwendeten Temperaturbereich eine Abweichung von etwa 4 kHz bei den Grenzfrequenzen.

Bei höherer Temperatur ergibt sich eine entsprechend höhere Grenzfrequenz. Allerdings nur bis etwa 75 °C, da dann die Schallgeschwindigkeit in Wasser wieder abnimmt.

Auch bei Erhöhung des Druckes nimmt die Schallgeschwindigkeit in Wasser leicht zu. In Annäherung entspricht die Schallgeschwindigkeit bei 100 bar Druck (z.B. 1 km

Wassertiefe) bei 5°C kaltem Wasser etwa der Schallgeschwindigkeit unter Atmosphärendruck bei 20°C warmem Wasser.

Für einen Abstand der Membrantaschen von 8 mm ergibt sich eine Grenzfrequenz von 92,8 kHz (Reuter et al 2008).

Nun kann auch die Frage beantwortet werden, welchen Abstand die Membrantaschen voneinander haben müssen, damit auch bei 35 kHz die Schallwellen zwischen die Membrantaschen gelangen können:

$$d = (c/f_c)/2$$

für 20°C:

$$d = (1484 \text{ m/s} / 35 \text{ kHz}) / 2 = 21,12 \text{ mm}.$$

Bei 0°C kaltem Wasser würde ein Membrantaschenabstand von 20,1 mm reichen. Zu klären ist bei einem entsprechenden Membrantaschenabstand und der Anwendung von 35 kHz allerdings, ob auch hier die Membranintegrität gewährleistet bleibt.

Rein rechnerisch dürfte der Membrantaschenabstand bei 130 kHz und 0°C kaltem Wasser bis 5,41 mm heruntergehen. Zu klären wäre aber die Frage, ob für eine optimale Funktion des Reinigungsverfahrens nicht etwa der doppelte Membrantaschenabstand, an Stelle des Abstands der unteren Grenze eingesetzt werden sollte. Da die Membrantaschen biegsam sind, ergibt sich beim Betrieb ein schwankender Membrantaschenabstand.

#### **4.2.7 Versuchsreihe 4: Variation der Beschallungsdauer**

Da bei der Anwendung von Ultraschallverfahren auch immer die Energiebilanz eine Rolle spielt, damit ein solches Verfahren auch wirtschaftlich interessant ist, wurden Versuche zur Beschallungsdauer im USL- Verfahren durchgeführt.

Dabei wurden Beschallungsdauern von 1 min, 1 ½ min und 30 sec ausgewählt. Um das Verhalten des TMP vergleichend bewerten zu können, wurde der Ultraschall auch 2 Tage lang abgeschaltet. Die Versuchsreihe dauerte 16 Tage.

In Abbildung 30 ist die Druckkurve im Versuchszeitraum dargestellt. Um den Effekt unterschiedlicher Beschallungsdauer reell vergleichen zu können, ist die normierte Druckkurve (dunkelblau) zu betrachten. An ihrem geraden Verlauf ist deutlich erkennbar, dass sich kein Unterschied im Reinigungsergebnis ergibt, ob 30 sec, 1 min

oder 1 ½ min im USL-Verfahren beschallt wurde. Wird im Vergleich dazu kein Ultraschall eingesetzt, nimmt der Unterdruck sofort zu, wie im mit einem Kreis gekennzeichneten Bereich der Abbildung 30 zu sehen ist.

Durch konstante Betriebsweise mit nur 30 sec Beschallungsdauer bei weiterem Betrieb zeigte sich das Verfahren auch über den Zeitraum von 3 Monaten dauerhaft leistungsfähig. Dadurch kann gegenüber den vorigen Versuchsläufen mit einer Minute Beschallungsdauer die Hälfte an Energie eingespart werden, mit gleichem Reinigungsergebnis.

Auch die Wasserqualität zeigte sehr gute Werte, wobei erkennbar war, dass ein konstanter Anlagenbetrieb eine gleichmäßig gute Qualität unterstützt.

Bei längerer Dauer der Ultraschallanwendung dispergierten sich die Partikel im Filtrationstank.

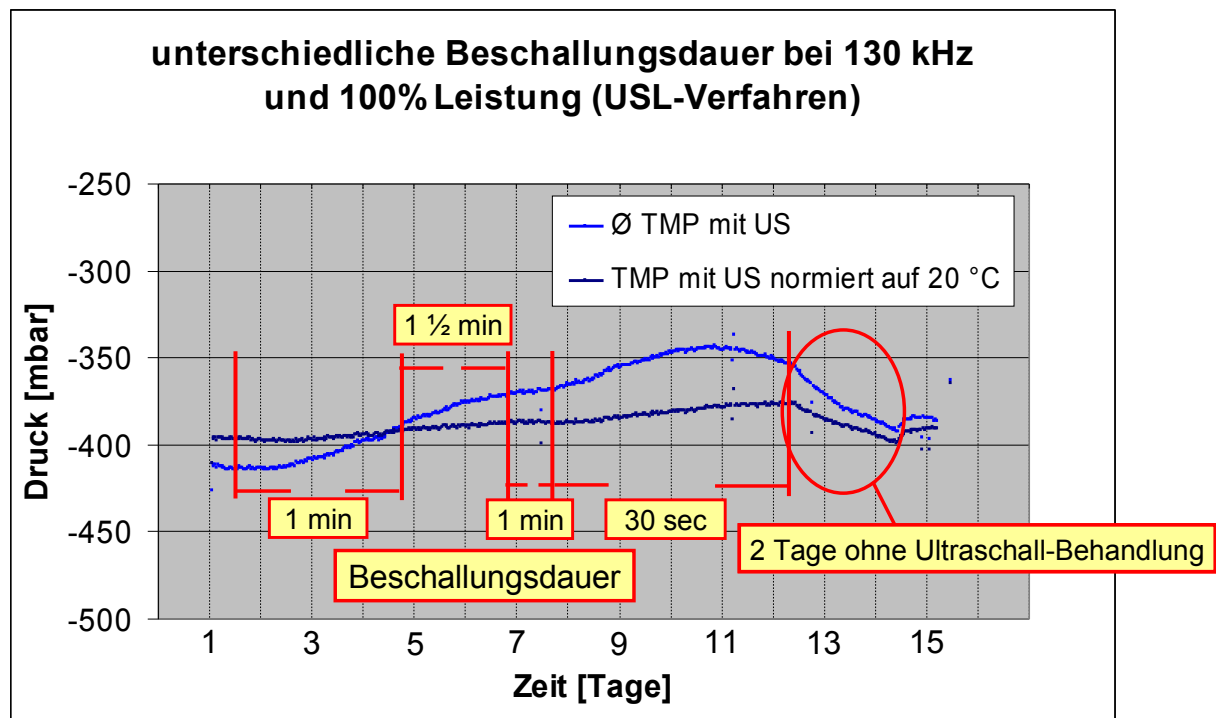


Abbildung 30: Der Einfluss unterschiedlicher Beschallungsdauer im USL-Verfahren bei 130 kHz und 4000 Watt (100 %) Leistung und der Vergleich zum Betrieb ohne Ultraschall.

#### 4.2.8 Versuchsreihe 5: Leistungsfähigkeit des USL-Verfahrens bei neuen und verschmutzten Membranen

Da bei den anderen Versuchsreihen die Membranen bereits einige Zeit ohne Ultraschall betrieben wurden und daher stets eine Deckschicht während des Filtrationsprozesses vorhanden war, wurden nun neue Membranen eingesetzt. Damit soll fest-

gestellt werden, wie hoch die Leistungsfähigkeit des USL-Verfahrens ist, wenn es von Beginn an eingesetzt wird.

Um die Betriebsdaten beider Membranen zu ermitteln, wurden sie parallel und zunächst ohne Ultraschalleinsatz mit gereinigtem Wasser betrieben. Sollte es Abweichungen geben, wäre das nachfolgend beim Vergleich mit der Leistung des Ultraschall-Einsatzes zu berücksichtigen, um damit auch eine echte Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Dabei wurde wieder gemäß den Vorgaben des Membranherstellers mit 10 L/(m<sup>2</sup>•h) begonnen und die Filtrationsleistung langsam auf 50 L/(m<sup>2</sup>•h) gesteigert. Auch 60 L/(m<sup>2</sup>•h) waren mit den neuen Membranen, sowie sauberem Wasser problemlos möglich, weitere Steigerungsraten beim Durchfluss konnten jedoch nicht erprobt werden, da die Anlagenauslegung dies nicht ermöglichte (Pumpen, Durchflussmesser etc.).

Tabelle 3 gibt die Werte für die transmembranen Druckdifferenzen bei entsprechendem spezifischen Membranfluss von neuen Membranen mit sauberem Wasser (Trinkwasserqualität) wieder.

Tabelle 3: spezifischer Membranfluss und TMP der neuen Membranen

<b>spezifischer Membranfluss [L/(m<sup>2</sup>•h)]</b>	<b>TMP [mbar]</b>
10	-29
20	-42
30	-51
40	-66
50	-71

Es wurde zu Beginn von Versuchsreihe 5 bei der Beaufschlagung mit sauberem Wasser ein konstanter Betrieb mit 50 L/(m<sup>2</sup>•h) erreicht, bei dem die parallel laufenden Membranen beider Linien der Versuchsanlage die gleichen Werte der transmembranen Druckdifferenz aufwiesen und damit eine korrekte Vergleichbarkeit ermöglichten.

Schon die erste Rückspülung im USL-Verfahren bei 130 kHz mit 4000 Watt Leistung und 30 sec Dauer im sweep-mode zeigte eine etwa um ein Drittel verbesserte transmembrane Druckdifferenz. Die Membranen waren zu dieser Zeit durch die vorhergehenden Vergleichsläufe nur mit hauchdünner Deckschicht belegt.

In Abbildung 31 wird erkennbar, dass bei neuwertiger Membran mit Hilfe des USL-Verfahrens besonders hohe Steigerungsraten bei der Permeabilität erzeugt werden konnten. Dabei ist das Einschalten des Ultraschalls am sofortigen Anstieg der Per-

meabilität erkennbar (Punkt 2). Die Permeabilitäten lagen im Bereich von 900 L/(m<sup>2</sup>•h•bar) gegenüber den Werten von 100-200 L/(m<sup>2</sup>•h•bar) aus der ersten und zweiten Versuchsreihe.

Bei abgeschaltetem Ultraschall (Punkt 3) wurde erkennbar, dass sich die ansonsten mit Ultraschall behandelte Linie 1 bei der Permeabilität der Linie 2 ohne Ultraschallbehandlung annäherte. Wird der Ultraschall wieder angeschaltet, steigt die Permeabilität sofort wieder an, erreicht jedoch nicht mehr dasselbe Permeabilitätsniveau wie zuvor (Punkt 4), was zum einen zeigt, dass nicht eingesetzter Ultraschall nur schwer wieder kompensiert werden kann und zum anderen, dass eine konstante Betriebsweise dem Verfahren zuträglich ist.

Betriebsweisen für die Abbildungen 31 und 32, gekennzeichnet durch rote Ziffern:

- 1) beide Membranen ohne Ultraschall, 50 L/(m<sup>2</sup>•h)
- 2) mit USL, 4000 Watt Leistung, 30 sec, 130 kHz
- 3) beide Membranen ohne Ultraschall, 40 L/(m<sup>2</sup>•h), 5 Tage
- 4) mit USL, 4000 Watt Leistung, 30 sec, 130 kHz
- 5) mit USL, 2000 Watt Leistung, 30 sec, 130 kHz

Die Lücke zwischen dem 6. und 7. Tag ist ein Datenaufzeichnungsausfall.

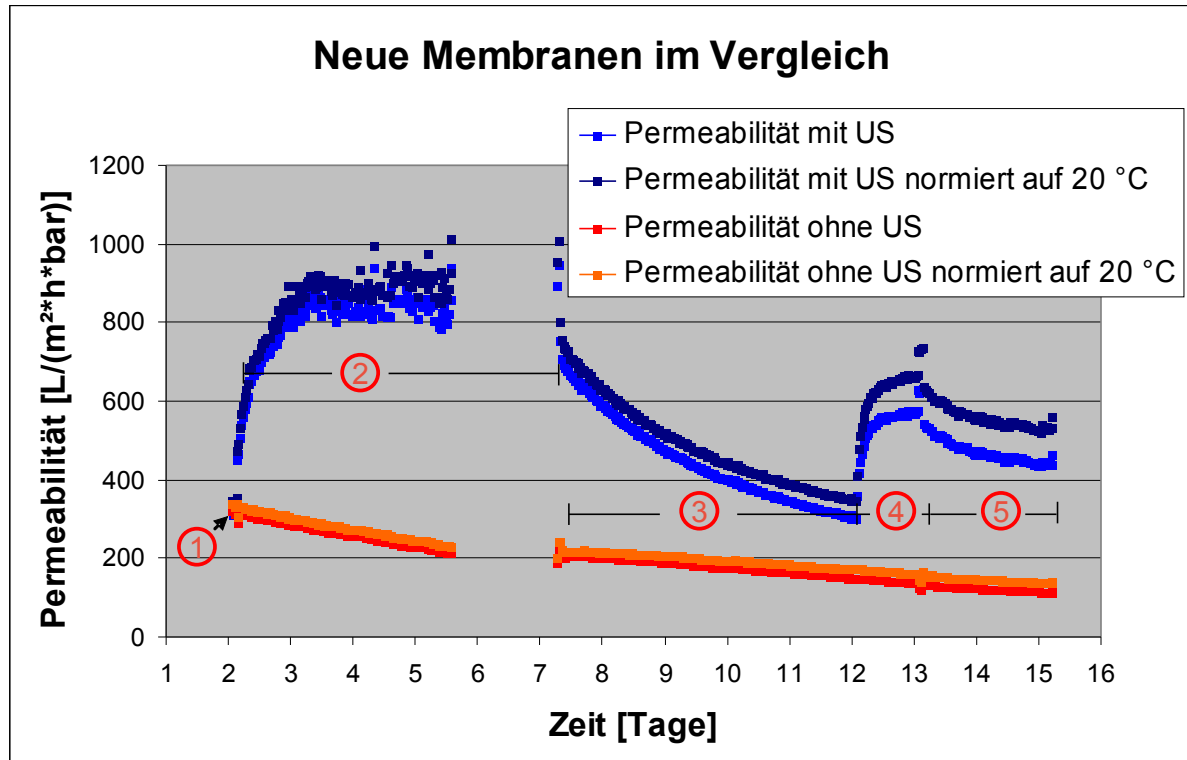


Abbildung 31: Unterschiedliche Betriebsweisen bei neuen Membranen. USL-Verfahren (blau) ohne Ultraschall (rot)

Bei den Trübungswerten (Abb. 32) ist festzustellen, dass sie sich nicht verhalten wie bei deckschichtkontrollierter Filtration. Hier wurden die Trübungswerte bei Ultraschalleinsatz geringfügig schlechter, was im wesentlichen bei der Erhöhung der Rückspülpeaks zu sehen ist (Punkt 4). Wird die Ultraschalleistung jedoch zurückgenommen von 100% entsprechend 4000 Watt auf 50% entsprechend 2000 Watt, verbessern sich die Trübungswerte (Punkt 5) wieder (Abb. 32).

Da der Ultraschall nur bei der Rückspülung eingesetzt wird, somit also kein Hineindrücken von Partikeln aus dem Rohwasser erfolgen dürfte, kann davon ausgegangen werden, dass der Ultraschall Partikel auf der Innenseite der Membran bzw. den angeschlossenen Rohrleitungen mobilisiert. Diese werden dann nach Anlauf der Filtration mit geringer Zeitverzögerung kumuliert gezählt.

Wird die Ultraschalleistung um 50% reduziert und nur noch mit 2000 Watt beschallt, gehen die Rückspülpeaks sofort deutlich zurück, wie bei Abbildung 32, Punkt 5 gegenüber Punkt 4 zu sehen ist.

Unter Punkt 1 sind die Trübungswerte zu sehen, bevor die Membran zum ersten Mal mit Ultraschall behandelt wurde.

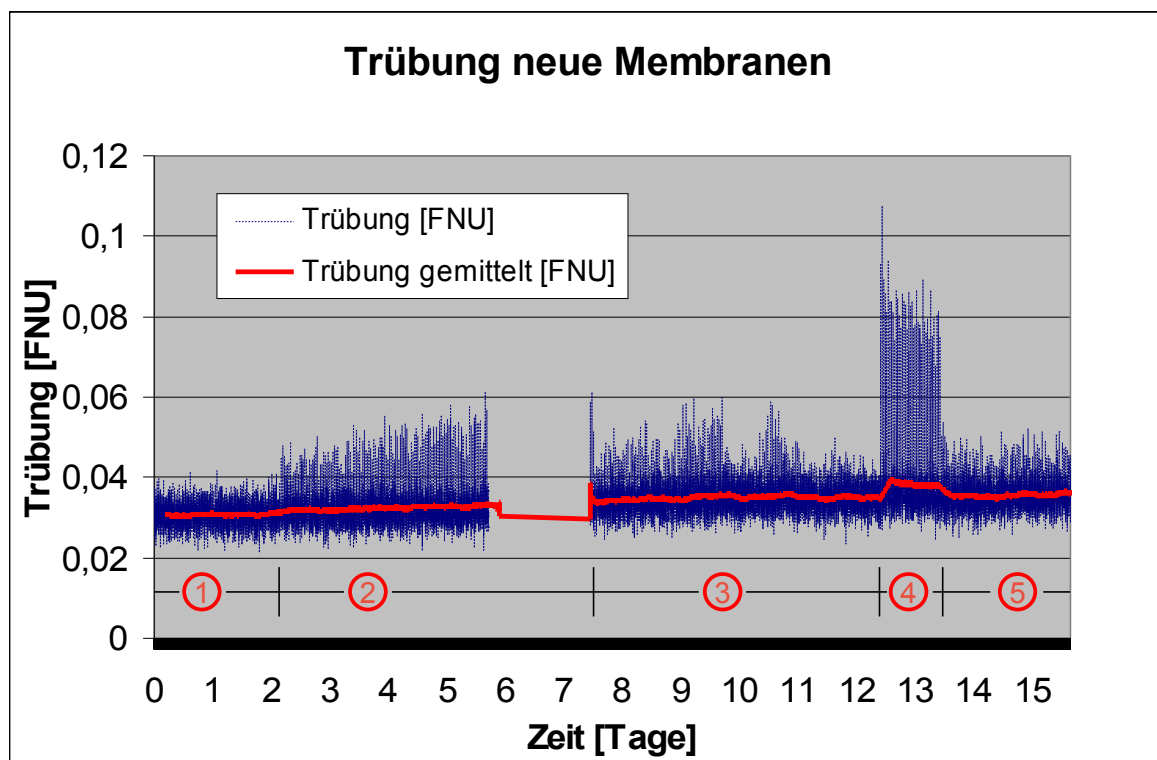


Abbildung 32: Die Trübungswerte analog zur Abbildung 31.

Wird die Membran von Anfang an mit dem USL-Verfahren behandelt, so kann die Deckschicht immer wieder nahezu vollständig entfernt werden. Eine nicht ganz gleichmäßige Entfernung ist durch eine ungleiche Verteilung des Schallfeldes be-



dingt. Mit Hilfe des USL-Verfahrens sind die Membranflächen dennoch größtenteils weiß im Vergleich zum nicht mit Ultraschall behandelten Membranmodul, welches durch Flockungsmittelrückstände gleichmäßig rostfarben belegt ist. Abb. 33 zeigt ein von Anfang an mit USL-Verfahren behandeltes Membranmodul.

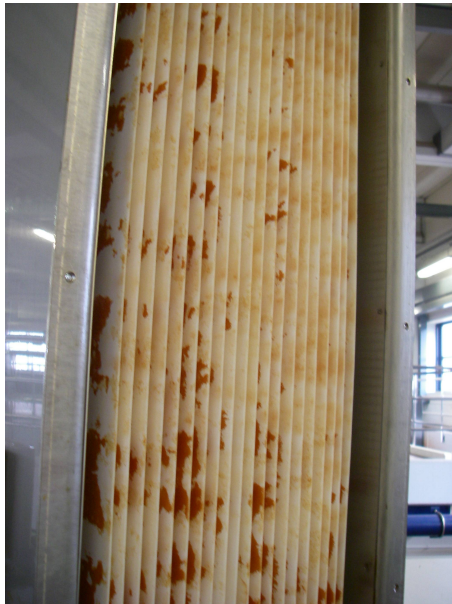


Abbildung: 33: Von Anfang an mit USL-Verfahren behandeltes Membranmodul. Die weißen Flächen sind vollständig abgereingt

Um zu zeigen, ob eine Verbesserung der Betriebswerte mittels USL-Verfahren auch bei einer verschmutzten Membran, die bereits länger ohne Reinigung in Betrieb war, möglich ist, wurde die Membran, die ein Jahr lang parallel zur ultraschallbehandelten Linie in Betrieb war, nun mit Ultraschall behandelt. Diese Membran hatte bereits eine dicke Deckschicht aus Flockungsmittelrückständen aufgebaut. Daher konnte die Membran nur mit 20 L/(m<sup>2</sup>•h) beaufschlagt werden. Nach einer geringfügigen Permeabilitätserhöhung lief die Membran auf konstantem Niveau. Das heißt, durch nicht eingesetzten Ultraschall entstandene Verblockungen können durch spätere Einwirkung von Ultraschall nicht entfernt werden. Möglicherweise hätte ein Einsatz mit anderen Ultraschallparametern eine Reinigung ermöglicht, beispielsweise mit einer niedrigeren Frequenz und unter Umständen einem dazu passend gewählten, vergrößerten Membrantaschenabstand. Diese Untersuchungsmöglichkeit war hier nicht durchführbar, da der Membrantaschenabstand aufgrund der notwendigen Dichtigkeit des Membranmoduls nicht nachträglich verändert werden konnte.

Dennoch ließ sich feststellen, dass die Permeabilität ein konstantes Niveau einhielt und nicht, wie bei dem Betrieb ohne USL-Verfahren, nach kurzer Betriebsdauer aufgrund des Erreichens des Maximalunterdrucks ausfiel.

Abb. 34 zeigt den Permeabilitätsverlauf der Membran über den Zeitraum von 9 Tagen. Die Permeabilitätsschwankungen am Beginn der Ultraschallbehandlung sind deutlich erkennbar. Im Verlauf ergaben sich jedoch gleichmäßige Permeabilitätswerte.

Die Trübungswerte waren zunächst relativ hoch. Sie wurden im Verlauf der Filtration mit konstanter Betriebsweise langsam niedriger (Abb. 35).

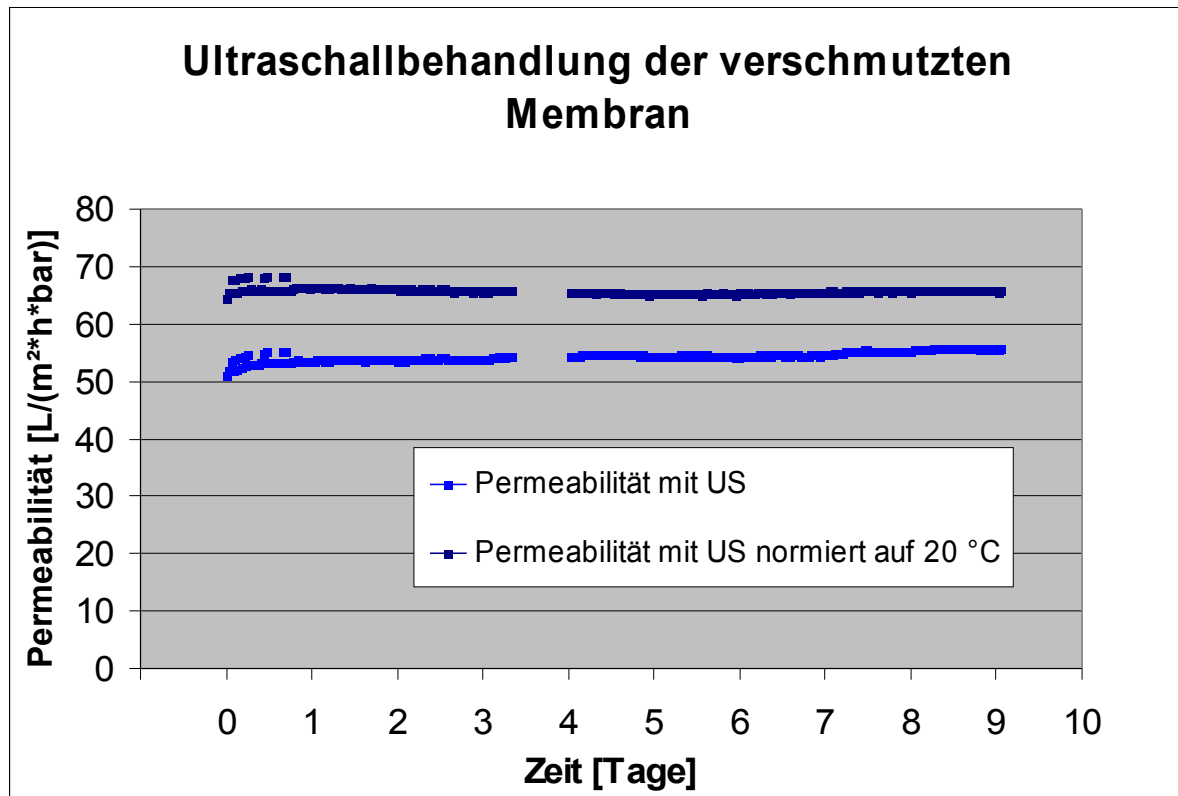


Abbildung 34: Permeabilitätsverlauf der Membran mit Ultraschallreinigung, nachdem diese vorher ein Jahr lang ohne Ultraschall in Betrieb war.

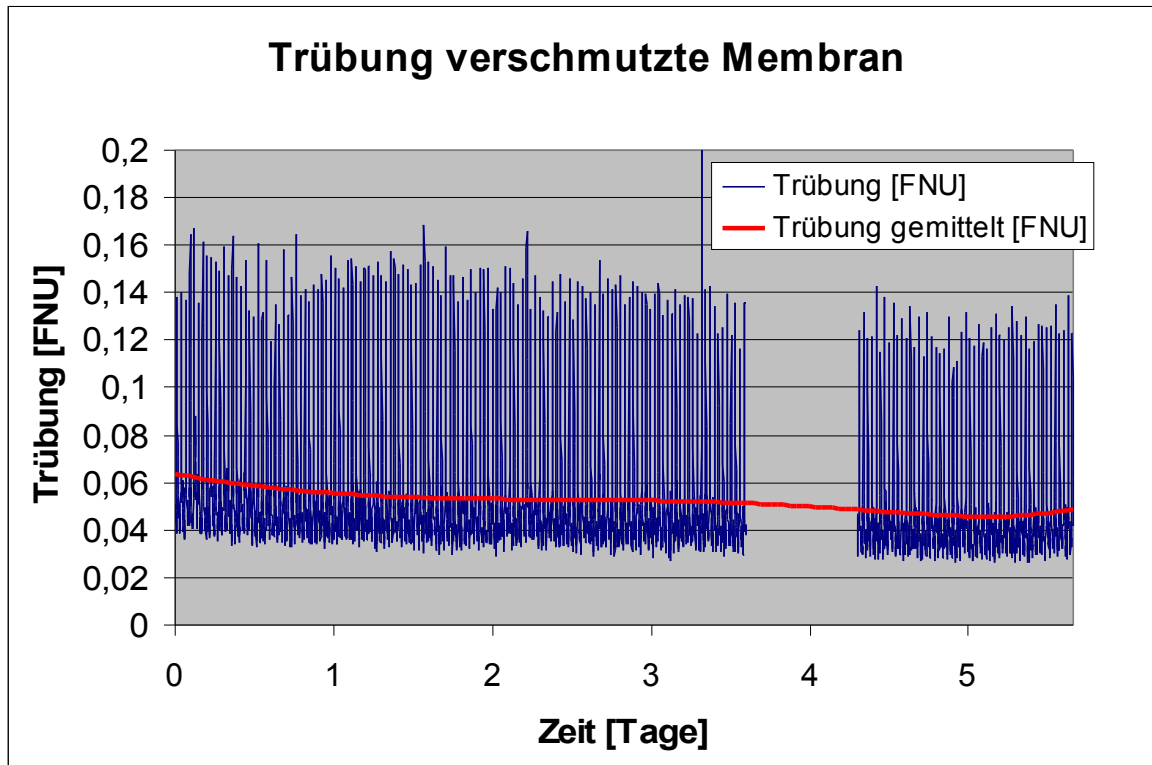


Abbildung 35: Die Trübung am Beginn der Ultraschallbehandlung der bis dahin unbehandelten Membran.

Im weiteren Verlauf des Filtrationsbetriebs der bereits verschmutzten Membran (Abb. 36) über einen Zeitraum von insgesamt 25 Tagen, wurde die Permeabilität jedoch geringfügig schlechter und zwar ab dem 22. Versuchstag.

Dies galt jedoch nicht für die Trübungswerte. Diese wurden im Verlauf des Versuches stetig besser und erreichten während der Filtration mit 0,016 FNU Werte unter 0,02 FNU (Abb.37).

Diese Verbesserung könnte, analog oben gemachter Beobachtungen der Trübungsverbesserung durch Ultraschall (Kap. 4.2.5), u. a. daran liegen, dass der Ultraschall die Partikel im Filtrationstank dispergiert. Dadurch kommt es zu einer sehr fein strukturierten Deckschicht, die ihrerseits die Qualität des Filtrates verbessert. Da die alte Deckschicht nicht entfernt wurde, handelt es sich auch hier um eine deckschichtkontrollierte Filtration.

Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass bei einer neuwertigen Membran, die mit Ultraschall behandelt wird, zwar die Permeabilität erhöht wird, aber hier im Gegensatz zu der Membran mit Deckschicht, die Rückhalteleistung der Membran schlechter wird (Abb. 32: Trübung Neue Membranen mit Ultraschallbehandlung).

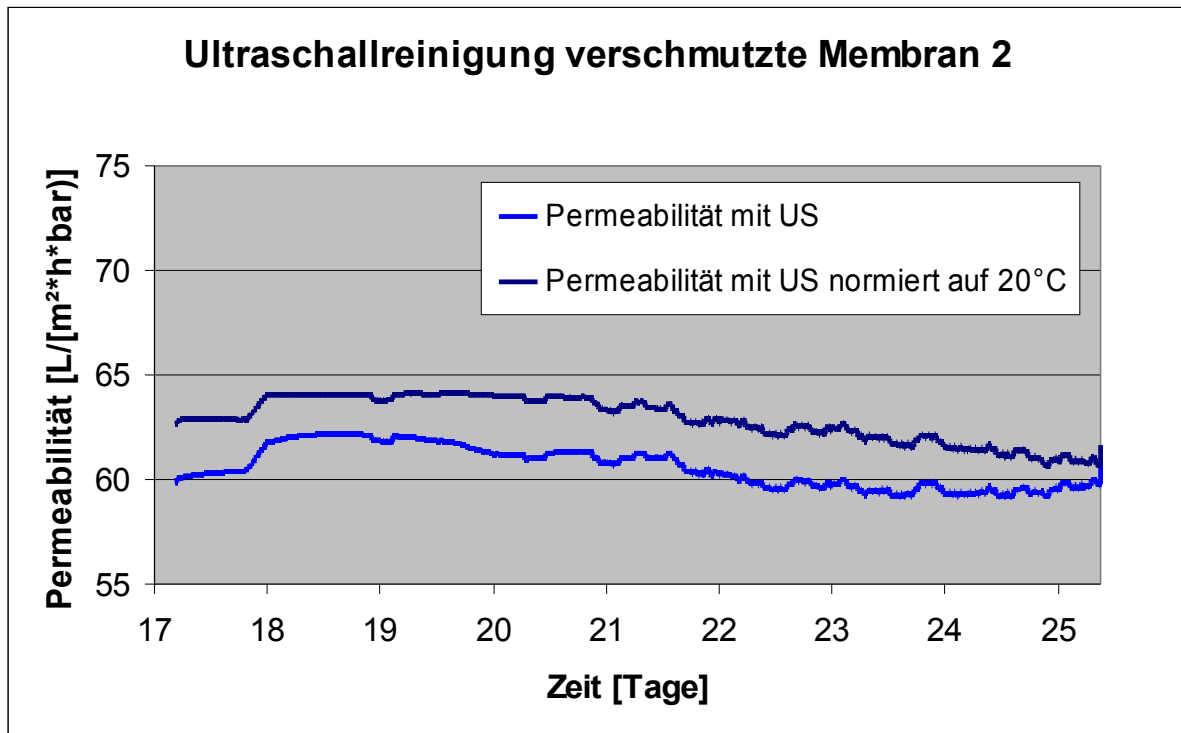


Abbildung 36: Permeabilitätsverlauf der verschmutzten Membran mit Ultraschallreinigung während des zweiten Versuchsabschnittes (17. bis 25. Versuchstag).

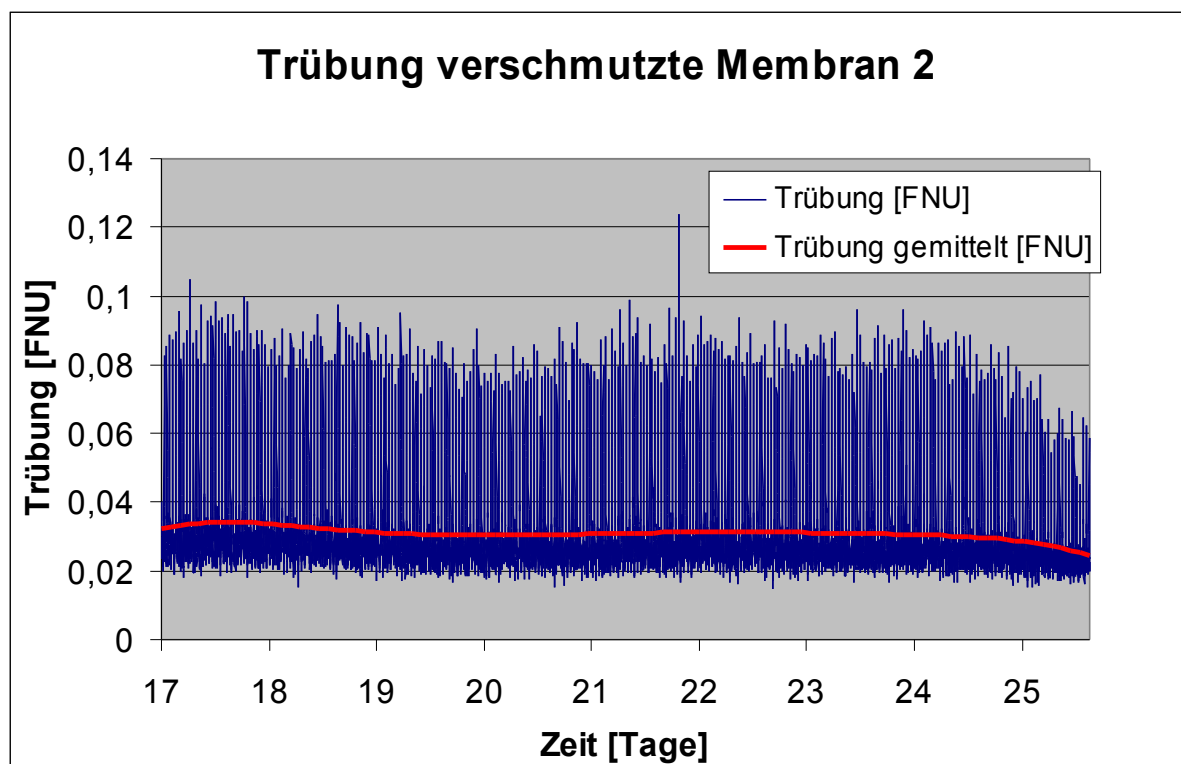


Abbildung 37: Die Trübungswerte vom 17. bis 25. Versuchstag.

Wie die Reinigungsleistung bei einer gering verschmutzten Membran aussieht, wurde in einer weiteren 5 tägigen Versuchsreihe untersucht. Dazu wurden die neuen Membranen gegeneinander getauscht, die erst 2,5 Monate in Betrieb waren. Hier war deutlich zu sehen, dass die mit Ultraschall behandelte Membran weiß war, d.h. ohne Deckschichtauflage, während die andere Membran eine dünne, rostfarbene Deckschicht aus Flockungsmittelrückständen aufwies.

Diese, nur gering verschmutzte Membran (2,5 Monate Filtrationsbetrieb ohne Ultraschall) wurde nun über einen Zeitraum von 5 Tagen intensiv mit Ultraschall behandelt.

Dabei wurde der spezifische Membranfluss der Membran, wie auch die Filtrationsdauer, langsam gesteigert: Bei einem Fluss von 20 L/(m<sup>2</sup>•h) über 30 L/(m<sup>2</sup>•h) bis zu 40 L/(m<sup>2</sup>•h) und bei der Filtrationsdauer von 3, 5, 10 und 15 min bis zu den gewohnten 30 min. Jedoch war erst ab der erneuten Reduzierung auf eine Filtrationsdauer von 15 min ein deutlicher Reinigungserfolg erkennbar (Abb. 38).

Bei der Trübung waren nach der Reinigung des Trübungsmessgerätes exzellente Trübungswerte zu verzeichnen, die im Schnitt 0,025 FNU betrugen und während der Filtration bis 0,01 FNU heruntergingen. Die Rückspülpeaks waren ebenfalls gering mit Werten bis 0,04 FNU (Abb. 39).

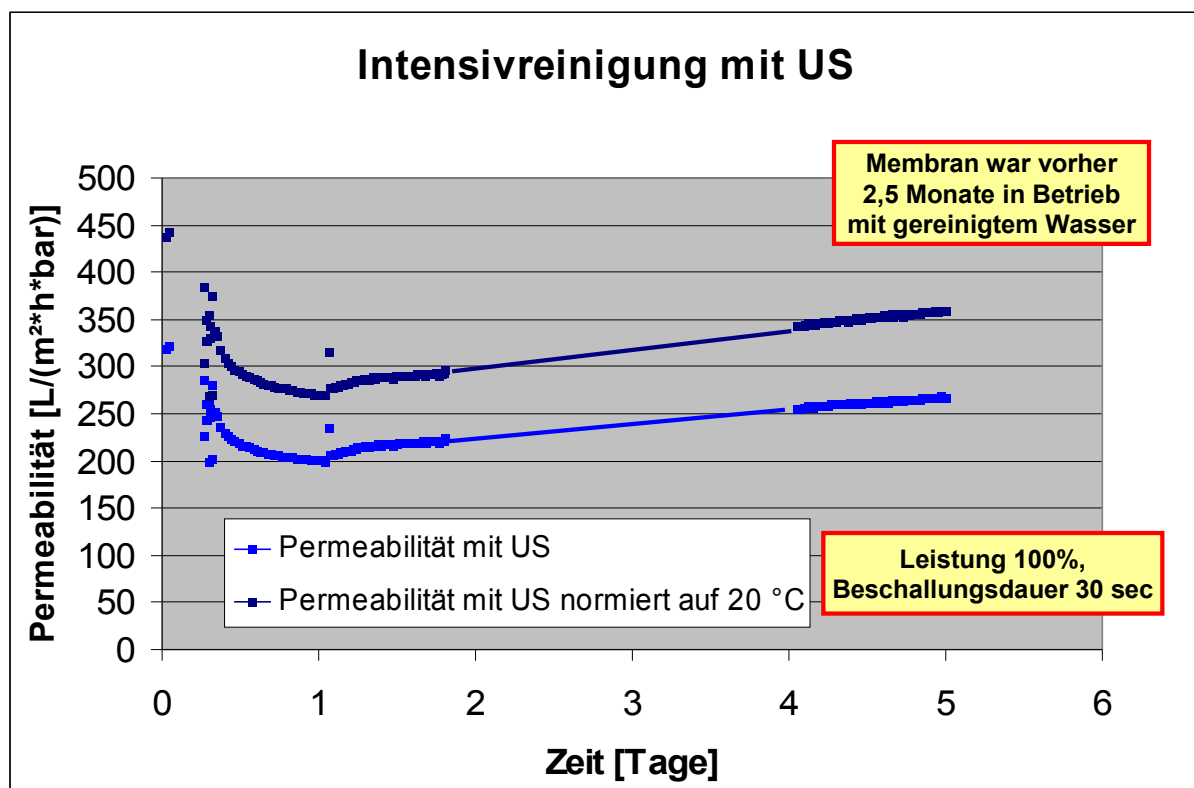


Abbildung 38: Intensivreinigung mit Ultraschall der nur kurzzeitig und gering verschmutzten Membran

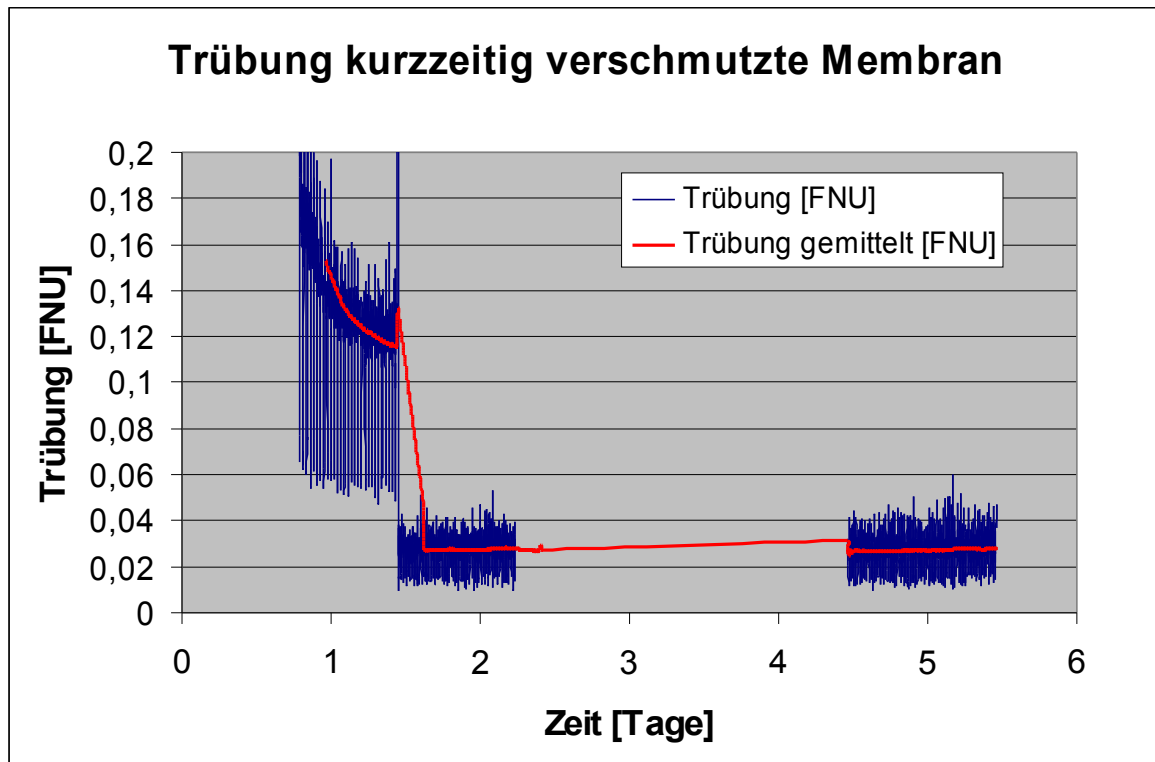


Abbildung 39: Trübung der erst kurzzeitig verschmutzten Membran mit Einsatz von Ultraschallreinigung. Der deutlich erkennbare Sprung am ersten Versuchstag ist bedingt durch die Reinigung des Trübungsmessgerätes

Anhand der in den Abbildungen 34 und 36 dokumentierten Versuchsergebnisse zeigt sich, dass bei langfristig und stärker verschmutzten Membranen mit Hilfe der hier gewählten Ultraschalleinstellungen keine vollständige Reinigung der Membranen möglich ist. Jedoch kann auch hier noch ein kontinuierlicher Betrieb auf niedrigerem Permeabilitätsniveau mit Hilfe von Ultraschall erreicht werden, wo ein weiterer Betrieb ansonsten praktisch nicht möglich wäre.

Bei kurzzeitig und gering verschmutzten Membranen ist es möglich, eine deutliche Verbesserung zu erzielen. Zum Teil ist eine Variation der Parameter-Einstellungen erforderlich, um zum Ziel zu gelangen.

Bei der Reinigung mit Hilfe von Ultraschall konnte bei sämtlichen bereits verschmutzten Membranen eine Verbesserung der Permeatqualität erzielt werden.

#### 4.2.9 Versuchsreihe 6: Variation der Ultraschall-Leistung

Die bisherigen Versuche mit 130 kHz wurden praktisch durchweg mit der Einstellung 100% Ultraschall-Leistung entsprechend 4000 Watt ausgeführt.

Nun ist die Frage zu klären, ob bei der verwendeten Frequenz von 130 kHz auch eine geringere Leistung ausreichend ist, um zum Reinigungserfolg zu gelangen. Dies ist auch im Sinne einer weiteren möglichen Energieeinsparung.

Dazu wurde eine weitere Versuchsreihe über einen Zeitraum von 14 Tagen durchgeführt, bei der Leistungseinstellungen von 50% (entsprechend 2000 Watt) und von 25% (entsprechend 1000 Watt) verwendet wurden.

Anhand der Permeabilitätskurve in Abbildung 40 ist erkennbar, dass bei einem Ultraschall-Leistungseintrag von 2000 Watt eine konstante Permeabilität erreicht werden kann. Bei einem Ultraschall-Eintrag von lediglich 1000 Watt ist ein deutlicher Permeabilitätsabfall erkennbar, vergleichbar mit der Filtration ohne Ultraschall-Einsatz. Hier ist davon auszugehen, dass der Energieeintrag zu gering ist, um die Kavitationsschwelle zu überschreiten. Somit kann keine Reinigung erzielt werden. Werden jedoch erneut 2000 Watt Leistung eingesetzt, ergibt sich wiederum ein deutlicher Permeabilitätsanstieg, wie in Abbildung 40 ab dem 12. Versuchstag erkennbar ist.

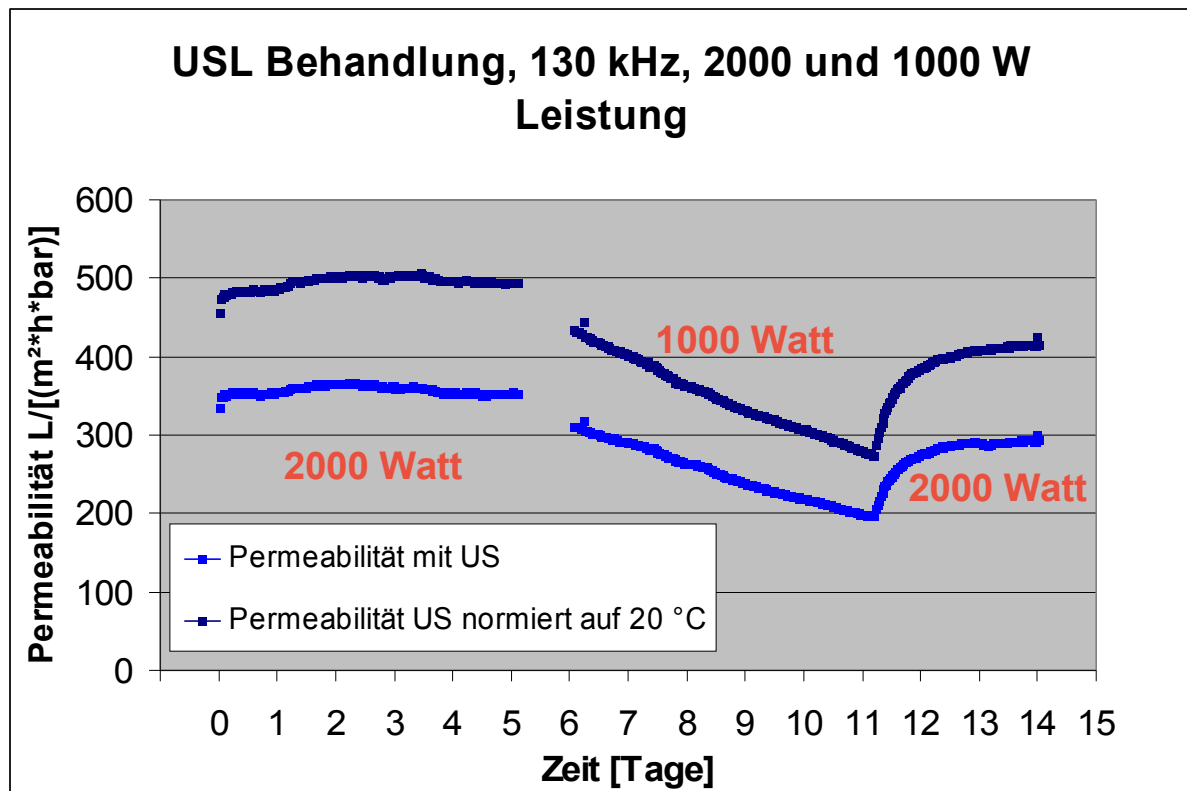


Abbildung 40: Verlauf der Permeabilität mit einer Ultraschall-Leistung von 2000 Watt und von 1000 Watt

Bei der Trübung (Abb. 41) ist erkennbar, dass die Rückspülpeaks bei einer Ultraschall-Leistung von 1000 Watt niedriger liegen als bei einer Ultraschall-Leistung von 2000 Watt. Ansonsten zeigen die Trübungswerte eine leichte Tendenz nach oben. Wie sich etwas später herausstellte, war das Trübungsmessgerät verschmutzt und

zeigte nach der Reinigung (Abb. 39: Trübung der kurzzeitig verschmutzten Membran, erster Versuchstag) wieder deutlich niedrigere Werte. Somit ist zu vermuten, dass dies auch hier bei der Versuchsreihe direkt davor eine Rolle gespielt haben könnte und sich daraus die schlechteren Werte von 0,04 - 0,05 FNU ergeben.

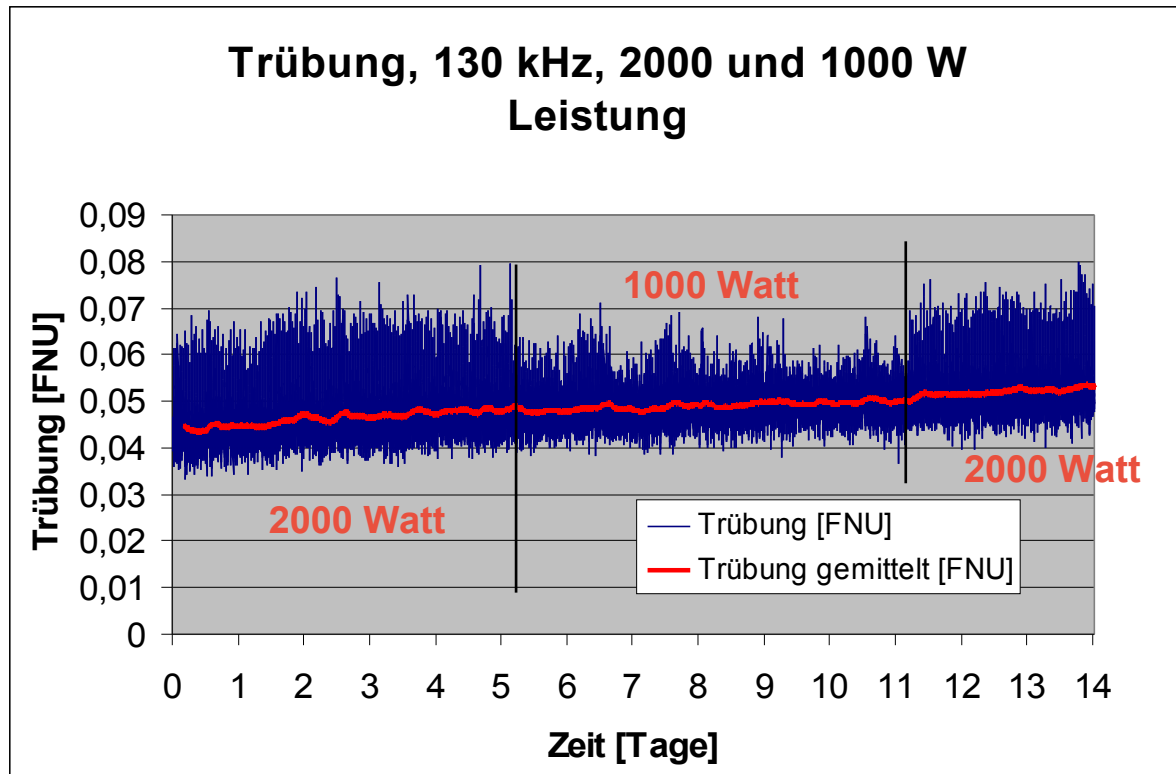


Abbildung 41: Verlauf der Trübung analog zur Permeabilitätskurve der Abbildung 40

#### 4.2.10 Versuchsreihe 7: Einsatz von nicht vorgereinigtem Rohwasser

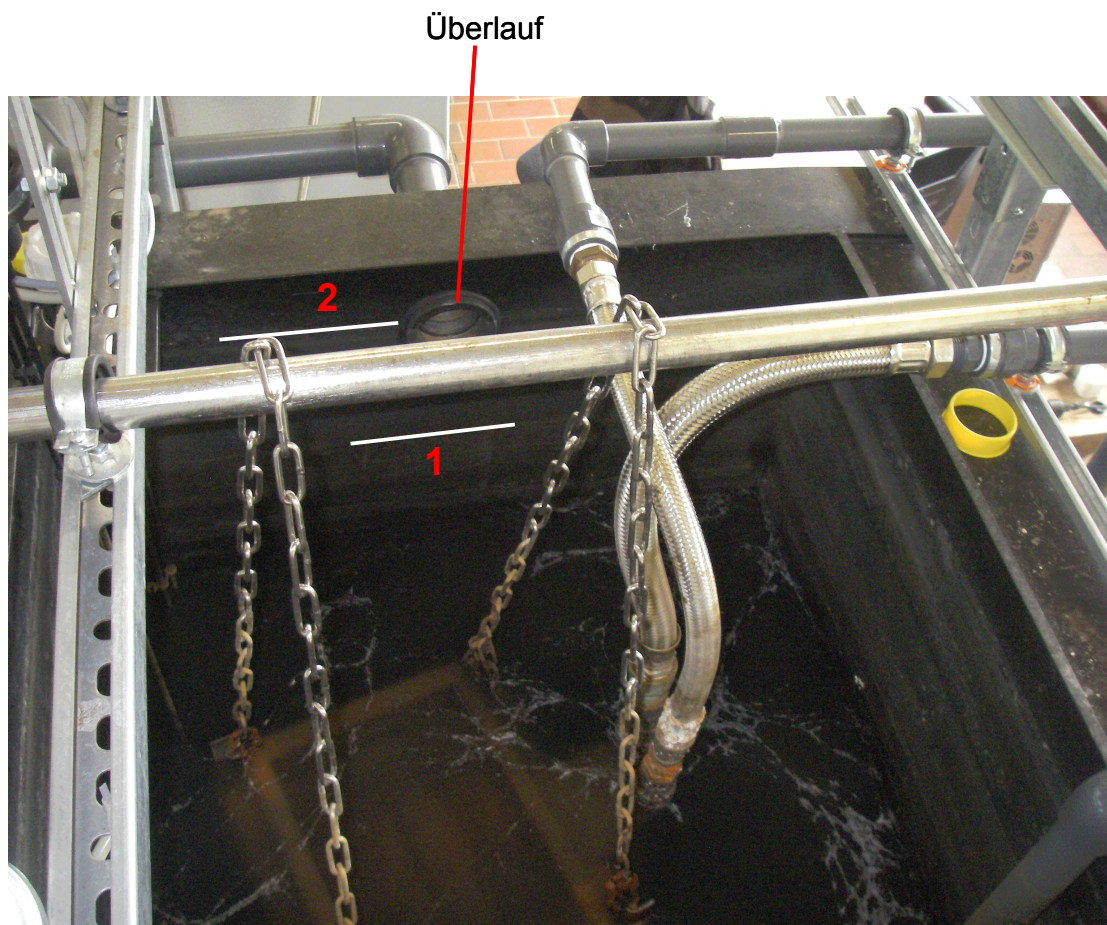
Nach entsprechenden Versuchsreihen mit vorgereinigtem Wasser und den Erkenntnissen, welche Verfahrenskombination und Parametereinstellungen sinnvoll einsetzbar sind, stellt sich nun die Frage, ob das System auch mit nicht vorgereinigtem Wasser aus dem Rhein funktionsfähig betrieben werden kann.

Dazu wurde die Versuchsanlage geringfügig umgebaut, denn die Aufkonzentration im Filtrationstank wäre bei so großer Feststoffbelastung ohne Konzentratabzug nach kurzer Zeit so hoch, dass ein kontinuierlicher Betrieb nicht zu realisieren wäre.

Daher wurde die Füllstandsregelung verändert und die Befüllung auf einem höheren Niveau eingestellt. Somit erreicht der Wasserstand bei jeder Befüllung das Überlaufniveau, so dass ein Teil des Konzentrates, welches bei der Befüllung aufgewirbelt wird, wieder abfließt. Die Praxis hat gezeigt, dass dies einer zu schnellen und hohen



Aufkonzentration entgegenwirkt. In Abbildung 42 sind die unterschiedlichen Befüllungshöhen an der Behälterwand des Filtrationstanks markiert.



**1** = Befüllungshöhe zur Filtration von vorgereinigtem Rohwasser

**2** = Befüllungshöhe nach Umbau zur Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser

Abbildung 42: Befüllungshöhe im Filtrationstank vor und nach dem Umbau

Als unvorgereinigtes Rohwasser wurde das Rheinwasser der Wasseraufbereitungsanlage Biebesheim genutzt. Dieses wurde aus der fließenden Welle entnommen und durch ein 1 mm Sieb geleitet, um grobe Bestandteile zu entfernen. Dieses Wasser wurde nun, wie bei den anderen Versuchsreihen, über den Vorlagetank, bei dem eine Absetzungsmöglichkeit für größere Partikel gegeben ist, und den 95  $\mu\text{m}$  Vorfilter der Anlage zugeleitet.

Hauptsächliche Bestandteile der abfiltrierbaren Stoffe des nicht vorgereinigten Rheinwassers sind Schwemmlern und geringe Mengen an organischen Bestandteilen.

Bei der ersten Versuchsreihe mit Rohwasser (Abb. 43) wurden zunächst beide Membranen zum Vergleich ohne Ultraschall und ohne Zufuhr von weiterem Schmutzwasser

ser betrieben. Die entsprechenden Permeabilitätswerte sind in Abbildung 43 unter Punkt 1 zu sehen.

Die Permeabilität der beiden Membranen ist von Beginn an bereits unterschiedlich, da die hier mit Ultraschall behandelte Membran noch aus den vorigen Versuchsläufen mit Ultraschallbehandlung profitiert. Die andere Membran wurde im vorhergehenden Versuchslauf nur kurzzeitig (5 Tage) mit Ultraschall behandelt (Abb. 38), ansonsten wurde sie ohne Ultraschall betrieben.

Beide Membranen wurden nun auf einen spezifischen Membranfluss von  $40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  eingestellt. Anschließend wurde Linie 1 mit Ultraschall im USL-Verfahren behandelt mit 30 sec Beschallungsdauer und 2000 Watt Ultraschall-Leistung. Ein Anstieg der Permeabilität (Abb. 43, Punkt 2) war sofort zu verzeichnen. Diese hielt sich dann auf annähernd konstantem Niveau.

Nun erfolgte die Umstellung auf die Zufuhr mit nicht vorbehandeltem Rohwasser (Punkt 3). Dieses hatte eine Trübung von 42 FNU. Hier wurde auch die Linie 2, die während der oben genannten Beschallung von Linie 1 abgeschaltet war, wieder zugeschaltet. Der spezifische Membranfluss blieb mit  $40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  gleich, ebenso die Einstellung mit 2000 Watt Leistung beim Ultraschall der Linie 1. Lediglich die Filtrationsdauer wurde von 30 min auf 15 min herabgesetzt. Zu erkennen ist bei beiden Membranen ein plötzlicher Leistungsabfall. Erst die Einstellung eines spezifischen Membranflusses von  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  und der Einsatz von 4000 Watt Leistung beim Ultraschall macht einen weiteren Filtrationsbetrieb der Linie 1 möglich (Punkt 4). Die Leistungsfähigkeit von Linie 2 kann ohne Einsatz von Ultraschall nicht erhalten werden. Somit ist es für Linie 2 unmöglich, nicht vorgereinigtes Wasser dauerhaft zu filtrieren.

Bei Linie 1 unterliegt die Permeabilität einer starken Schwankung. Diese entfiel bei Einstellung der Filtrationsdauer auf 30 min (Punkt 5). Hier war eine konstante Permeabilität zu verzeichnen, wenn auch auf einem, im Vergleich zu vorher, recht niedrigen Permeabilitätsniveau (normiert  $200 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ). Allerdings betrug die Rohwassertrübung hier bereits 100 FNU. Durch Austausch des Wassers im Filtrationstank und neuer Befüllung mit Rohwasser betrug die Trübung des zu filtrierenden Wassers nur noch 40 FNU (Punkt 6). Damit konnte die Permeabilität um 25% erhöht werden (normiert  $250 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ). Der vorher erfolgte diskontinuierliche Überlauf führte zu nicht ausreichender Verdünnung im Filtrationstank, da das zulaufende Rheinwasser kurzzeitig einer starken Trübung unterlag.

Betriebsweisen für die Abbildungen 43 und 44, gekennzeichnet durch rote Ziffern:

- 1) beide Membranen ohne Ultraschall, 40 L/(m<sup>2</sup>•h)
- 2) mit USL, 2000 Watt Leistung, 30 sec, 130 kHz
- 3) Zufuhr von Rohwasser, 40 L/(m<sup>2</sup>•h), 2000 Watt Leistung, 15 min Filtration,  
(→ steiler Leistungsabfall)
- 4) mit USL, 4000 Watt Leistung, 20 L/(m<sup>2</sup>•h), 15 min Filtration
- 5) mit USL, 4000 Watt Leistung, 20 L/(m<sup>2</sup>•h), 30 min Filtration, 100 FNU, 7°C
- 6) Tankreinigung → 40 FNU, gleiche Einstellung, wie 5

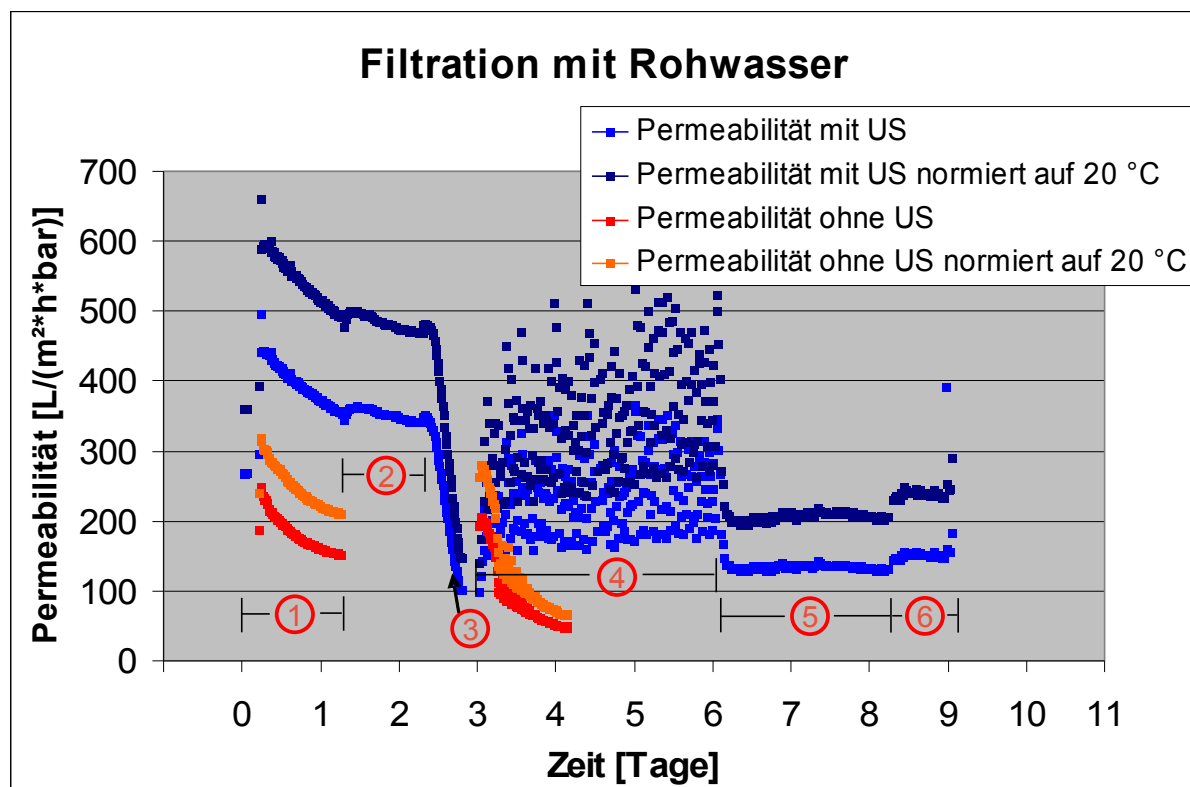


Abbildung 43: Die erste Filtration mit nicht vorgereinigtem Rohwasser

Der Verlauf der Trübung während der ersten Versuchsreihe mit Rohwasser ist in Abb. 44 dokumentiert.

Während der Filtration ohne und mit Ultraschall sowie ohne die Zufuhr des nicht vorgereinigten Rohwassers waren die Trübungswerte sehr niedrig, auch die Rückspülpeaks reichten nur bis etwa 0,05 FNU (Punkt 1 und 2). Sobald die Zufuhr des nicht vorgereinigten Rohwassers erfolgte, erhöhte sich die Trübung prägnant (Punkt 3). Das kurze Absinken der Kurve danach ist bedingt durch den Anlagenstillstand durch Erreichen des  $p_{\max}$  aufgrund des Permeabilitätsabfalls. Sobald die Filtration des nicht vorgereinigten Rohwassers mit einem geringeren spezifischen Membranfluss von

20 L/(m<sup>2</sup>•h) gegenüber 40 L/(m<sup>2</sup> •h) ausgeführt wurde, stiegen die Trübungswerte erneut noch stärker an (Punkt 4). Im Verlauf der Filtration werden sie ganz langsam wieder niedriger (Punkt 5), um schließlich Werte von 0,03 – 0,1 FNU während der Filtration zu erreichen (Punkt 6). Die Rückspülpeaks blieben bei diesem Versuch aber hoch.

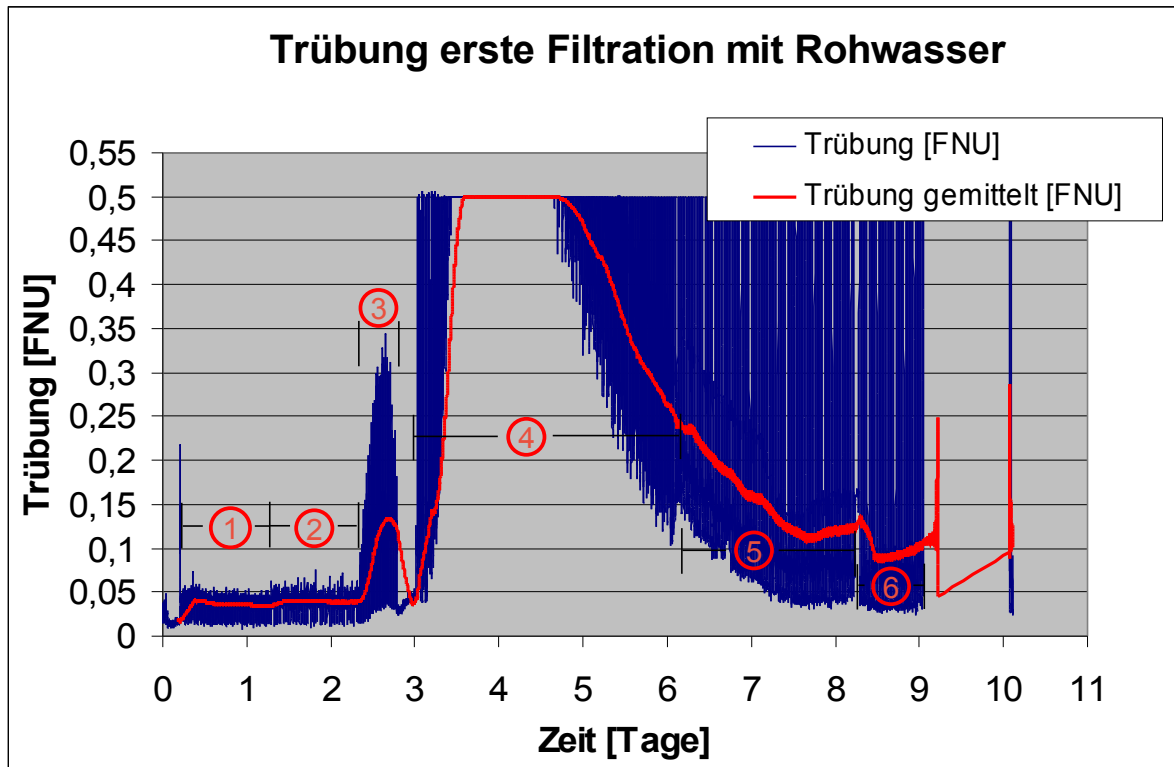


Abbildung 44: Trübungsverlauf während der ersten Versuche mit nicht vorgereinigtem Rohwasser

Das Foto (Abb. 45) der Wasserproben in den Küvetten zeigt zu filtrierendes Rohwasser von 100 FNU und das durch die Membran mit Hilfe des USL-Verfahrens gereinigte Wasser von etwa 0,06 FNU.



Abbildung 45: Wasserproben der Anlage. Links: Rohwasser von 100 FNU.  
Rechts: daraus durch die Membrananlage (mit USL-Verfahren) gereinigtes Wasser von 0,06 FNU

Nach einer Anlagenpause während des Winters von etwa 3 Monaten und der Befüllung der Filtrationstanks mit sauberem Wasser hatten die Membranen viel Relaxationszeit. Bei der erneuten Inbetriebnahme für eine neue Versuchsreihe mit nicht vorgereinigtem Rohwasser zeigten sich daher zu Beginn hohe Permeabilitätswerte (Abb. 46).

Auch bei den ersten Versuchsreihen (siehe Kap. 4.2.4 und Abbildung 21) zeigte sich bereits, dass sich eine Relaxationsphase sehr positiv auf die Permeabilität auswirkt. Selbst die nicht mit Ultraschall betriebene Linie 2 läuft 3,5 Tage bevor sie abschaltet, wegen Erreichen des voreingestellten Maximalunterdrucks ( $p_{\max}$ ) wenn auch nach dem ersten Tag auf niedrigem Permeabilitätsniveau (Abb. 46).

Auch die mit Ultraschall im USL-Verfahren betriebene Linie 1 verzeichnet zunächst einen Permeabilitätsabfall, jedoch kommt es nachfolgend zu plötzlichen Permeabilitätsanstiegen. Hier ist zu vermuten, dass sich bei der Erreichung einer bestimmten Deckschichtdicke ganze Schichten ablösen und damit die genannten, sprunghaften Permeabilitätsanstiege bewirken. Man könnte sie auch als „cleaning shocks“ bezeichnen, da die Anstiege sehr plötzlich und stark sind. Vermutlich sind sie bedingt durch das Ablösen ganzer Deckschichtbruchstücke, die zu einer rapiden Druckentlastung führen, da dem von der Saugpumpe erzeugten Unterdruck fast kein Widerstand mehr entgegensteht. Da die Saugpumpe auf eine bestimmte Literleistung eingestellt ist, dauert es vermutlich einen Moment, bis sie nachgeregelt hat und angepasst weniger Saugleistung erbringt. Die abgelösten Deckschichtbruchstücke waren im Filtrationstank als größere Belagsstücke zu sehen. Die Trübung des Rohwassers betrug während dieser Versuchsreihe 60-80 FNU.

Die Inbetriebnahme erfolgte zunächst für zwei 30 minütige Filtrationsphasen mit einem spezifischen Membranfluss von  $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , danach mit  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ . Die Rückspüldauer betrug eine Minute und während des ersten Versuchstages wurde mit 30 sec Beschallungsdauer bei 4000 Watt Leistung und mit 130 kHz beschallt. Ab dem zweiten Versuchstag betrug die Beschallungsdauer nur noch 15 sec. Das Ergebnis zeigt, dass selbst die verkürzte Beschallungsdauer ausreichend für den Reinigungseffekt ist (Abb. 46).

Nun stellt sich die Frage, welche Trübungswerte das Permeat aufweist und ob nicht während der „cleaning shocks“ Trübungseinbrüche zu verzeichnen sind.

Ein Blick auf den Verlauf der Trübungswerte (Abb. 47) während dieses Filtrationsversuches zeigt, dass nach einer Einfahrphase mit hohen Trübungswerten zunächst kurz ein niedriges Niveau erreicht wird, bei dem die Werte während der Filtration bis unter 0,5 FNU reichen, danach aber wieder ein Trübungsanstieg stattfindet. Dieser ist jedoch geringer und die Werte werden nachfolgend immer niedriger und liegen dann auf einem Niveau von 0,03 FNU während der Filtration. Selbst die Rückspülpeaks werden deutlich niedriger und reichen dann nur noch bis etwa 0,1 FNU. Trotz der Permeabilitätssprünge ergeben sich damit nach der Einfahrphase außerordentlich gute Trübungswerte.

Hier hat sich eindrucksvoll gezeigt, dass es tatsächlich möglich ist, mit Hilfe des USL-Verfahrens auch Rohwässer mit einer Trübung von 60-80 FNU zu filtrieren und dabei nicht nur sehr gute Permeabilitätswerte zu erzielen, sondern auch eine sehr gute Reinigungsleistung des Rohwassers mit exzellenten Trübungswerten zu erreichen.

Auch der Energieeinsatz konnte mit 15 Sekunden Beschallungsdauer gegenüber 30 Sekunden nochmals halbiert werden. Der für den Ultraschall aufzuwendende Energieeinsatz beträgt in diesem Fall, mit nur 15 sec Beschallungsdauer,  $0,168 \text{ kWh}/\text{m}^3$  Permeat (siehe Beispiel 4, S. 102).



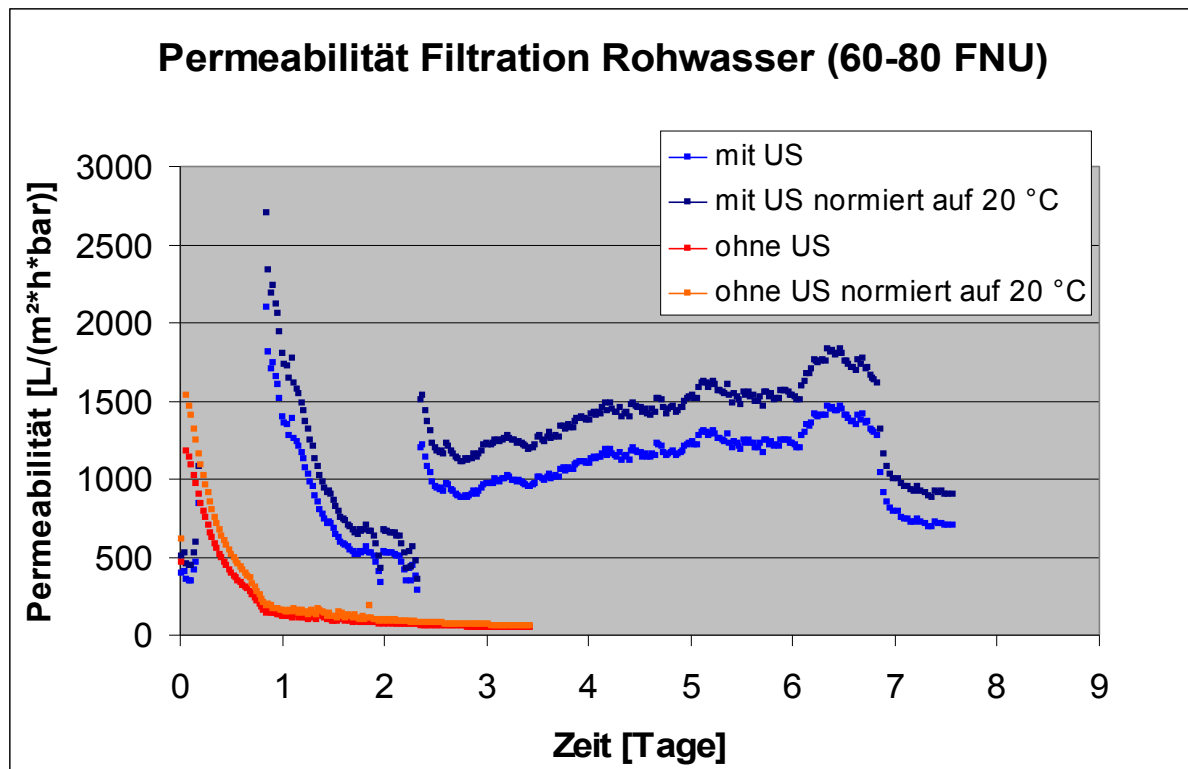


Abbildung 46: Permeabilität bei der Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach 3-monatiger Relaxationsphase

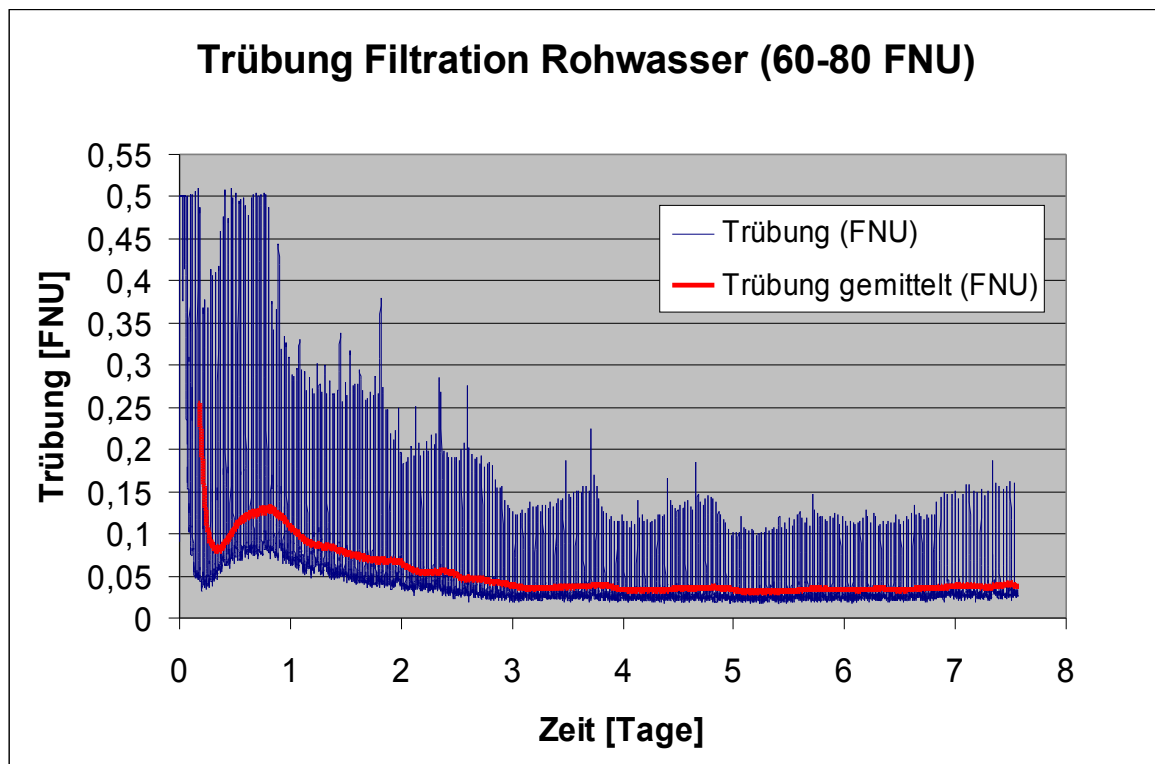


Abbildung 47: Verlauf der Trübung während der Filtrationsreihe von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach Relaxation

Eine weitere Frage ist, wie sich das System bei höheren Trübungswerten verhält. Hier sind u.a. Trübungswerte von 100 bis 300 FNU zu nennen.

Weiterhin wird untersucht, ob die Leistungsfähigkeit dahingehend gesteigert werden kann, dass eine längere Filtrationsdauer oder ein höherer spezifischer Membranfluss möglich ist.

Die am 7. Versuchstag geschaltete Verlängerung der Filtrationsdauer von 30 min auf 45 min bewirkte keine auffallende Verschlechterung bei der Permeatqualität (Abb. 47), jedoch lässt sich bei der Permeabilität ein deutlicher Abfall verzeichnen und zwar etwa auf den halben Wert (Abb. 46). Die Trübung des Rohwassers betrug zu dieser Zeit 60-80 FNU.

Am 8. Versuchstag wurde die Filtrationsdauer wieder auf 30 Minuten eingestellt. Dafür wurde der spezifische Membranfluss auf 30 L/(m<sup>2</sup>•h) erhöht. Auch dies quittiert die Permeabilitätskurve mit einem deutlichen Leistungsabfall und hat nun einen Permeabilitätswert von nur mehr 400 L/(m<sup>2</sup>•h•bar). Jedoch verläuft die Permeabilität in diesem Bereich anschließend konstant (Abb. 48). Bei der Permeatqualität ist jedoch sofort eine markante Verschlechterung zu sehen (Abb. 49). Die Trübung im Filtrationstank beträgt zu dieser Zeit 70-80 FNU.

Ab dem 9. Versuchstag wurde die Filtrationsdauer auf 15 Minuten reduziert, da das Wasser mittlerweile eine Trübung von 100 FNU erreicht hatte. Dies führte zu leichter Erhöhung der Permeabilität mit einem unruhigen Verlauf derselben, wie schon bei der ersten Versuchsreihe mit nicht vorgereinigtem Rohwasser zu beobachten war. Bei der Trübung brachte dies jedoch keine Verbesserung, eher im Gegenteil. Das liegt daran, dass die Filtrationsphase so kurz ist, dass die Trübungswerte nicht hinreichend absinken und die Rückspülpeaks umso mehr ins Gewicht fallen.

Am 10. Versuchstag wurde die Anlage wieder mit einem spezifischen Membranfluss von 20 L/(m<sup>2</sup>•h) und einer Filtrationsdauer von 30 Minuten gefahren, was eine deutliche, sprunghafte Erhöhung der Permeabilität bewirkte und zwar von einer Permeabilität um die 500 L/(m<sup>2</sup>•h•bar) auf einen Peak von 3000 L/(m<sup>2</sup>•h•bar). Gleichzeitig wurden die Trübungswerte wieder deutlich besser. Sie lagen im Bereich von 0,03-0,05 FNU während der Filtration. Da die Rückspülpeaks noch sehr hoch sind, verläuft die gemittelte Kurve deutlich über den Werten während der Filtration. Die Trübung im Filtrationstank lag an diesem Versuchstag bei 130 FNU. Offensichtlich kommt es bei der richtigen Einstellung für die Ultraschallreinigung zur plötzlichen Ablösung ganzer Deckschichtbruchstücke, den oben erwähnten „cleaning shocks“. Diese bewirken kurzzeitig hohe Permeabilitätswerte. Dass die Membranen nicht beschädigt sind,



zeigt sich unter anderem daran, dass die hohen Permeabilitätswerte immer mit Trübungsverbesserungen einhergehen und nicht mit Trübungseinbrüchen. Zur Kontrolle wurde bei der Membran ebenfalls ein Blasentest durchgeführt, der dokumentierte, dass die Membran eindeutig dicht war.

Am 11. Versuchstag verbessert sich die Trübung im Filtrationstank auf etwa 105 FNU durch die Zufuhr von relativ sauberem Rohwasser aus den Rhein. Nachfolgend läuft die Anlage konstant, die Rückspülpeaks gehen leicht zurück.

Ab dem 12. Versuchstag schwankt die Permeabilität von etwa 700-1000 L/(m<sup>2</sup>•h•bar) (normiert).

Der Permeabilitätssprung am 13. Versuchstag auf kurzfristig 2000 L/(m<sup>2</sup>•h•bar) bewirkte eine leichte Trübungsverminderung, besonders bei den Rückspülpeaks. Nachfolgend kam es wieder zu verminderter Permeabilität und einem leichten Anstieg der Trübungswerte.

Am 14. Versuchstag lag die gemessene Trübung im Filtrationstank bei 170-190 FNU. Dies bewirkte offensichtlich den Anstieg bei der Trübung, wie auch den Permeabilitätsabfall.

Zu einem deutlichen Trübungseinbruch kam es am 15. Versuchstag. Im Filtrationstank lag die Rohwassertrübung nun bei 300 FNU. Dieser Wert scheint zu hoch zu sein, um die vorherige Permeatqualität einzuhalten. Der durch Probenahme im Permeattank gemessene Wert des Permeates lag bei 0,12 FNU.

Auch beim zweiten Abschnitt dieser Versuchsreihe fällt auf, dass signifikante Anstiege bei der Permeabilität eine nachfolgende Verbesserung bei den Trübungswerten bewirken (Abb. 48 und 49).

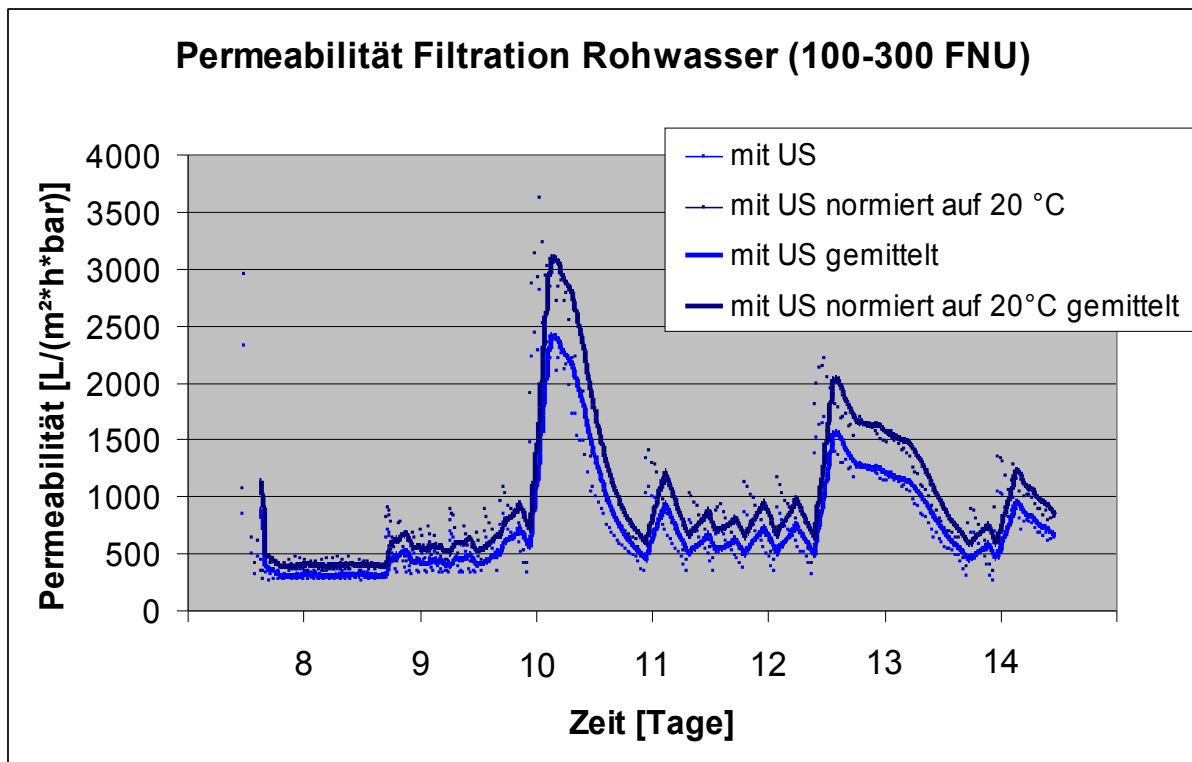


Abbildung 48: Verlauf der Permeabilität während des zweiten Abschnitts der Versuchsreihe mit nicht vorgereinigtem Rohwasser nach der Relaxationsphase.

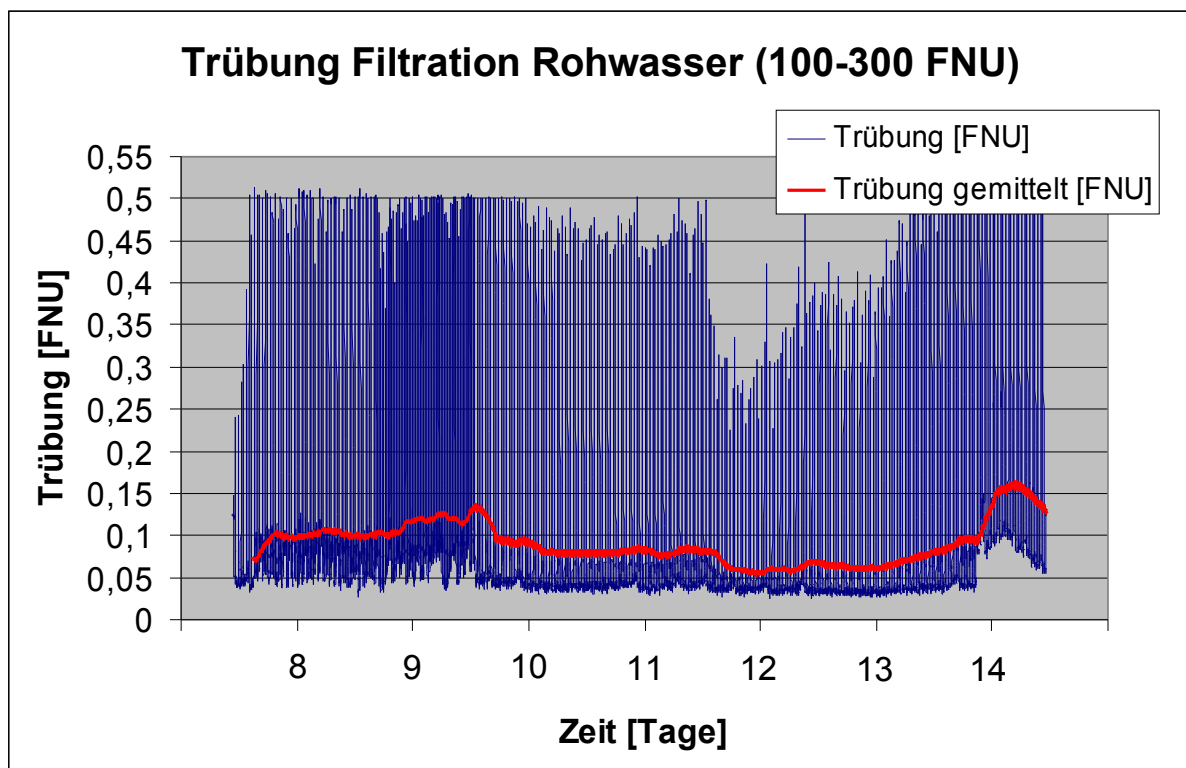


Abbildung 49: Verlauf der Trübung während des zweiten Versuchsabschnittes mit nicht vorgereinigtem Rohwasser.

Da sich bei einer Trübung des Rohwassers von 300 FNU die Permeatqualität deutlich verschlechterte, wurde das Wasser im Filtrationstank ausgetauscht. Die Anlage ging nachfolgend mit einer Trübung des Rohwassers von 50 FNU wieder in Betrieb. Der spezifische Membranfluss betrug  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  und der Ultraschall wurde im USL-Verfahren mit 130 kHz, 4000 Watt Leistung und 15 sec Beschallungsdauer bei 1 minütiger Rückspülphase geschaltet.

Am Beginn (15. Versuchstag) wies die Membran wieder eine hohe Permeabilität von  $2000 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$  auf, die jedoch rasch wieder abnahm, da sich durch eine Aufkonzentration im Filtrationstank durch schlechtes Zulaufwasser (Trübung im Rheinwasser von 50-60 FNU) die Trübung erhöhte.

Sie lag am 16. Versuchstag bereits bei 140 FNU, am 18. Versuchstag bei 150 FNU. Die Trübungswerte waren nach wie vor hoch und lagen während der Filtration im Wesentlichen zwischen 0,05 und 0,1 FNU. Die Permeabilität schwankte und lag vielfach nur um die  $200 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ , einzelne Permeabilitätspeaks lagen dagegen bei  $800 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ .

Eine deutliche Verbesserung ergab sich erst am 19. Versuchstag mit einem Permeabilitätsanstieg auf  $800 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ . Die Permeabilität stabilisierte sich nachfolgend auf einem Niveau um die  $1000 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ . Deutlich erkennbar war eine signifikante Verbesserung der Trübungswerte. Sie lagen wieder konstant auf niedrigem Niveau, während der Filtration bei 0,03 bis 0,04 FNU. Auch die Rückspülpeaks wurden deutlich geringer und reichten nur noch bis 0,25 FNU. Es zeigte sich wieder ein konstanter Betrieb.

Zu dieser Verbesserung hat das deutlich geringer verschmutzte Zulaufwasser vom Rhein beigetragen, welches mit nur noch 12-15 FNU zu einer Verdünnung im Filtrationstank führte, dessen Trübung am 21. Versuchstag 108 FNU betrug und am 24. Versuchstag 124 FNU. Die Abbildungen 50 und 51 zeigen den Verlauf der Permeabilität und der Trübung.

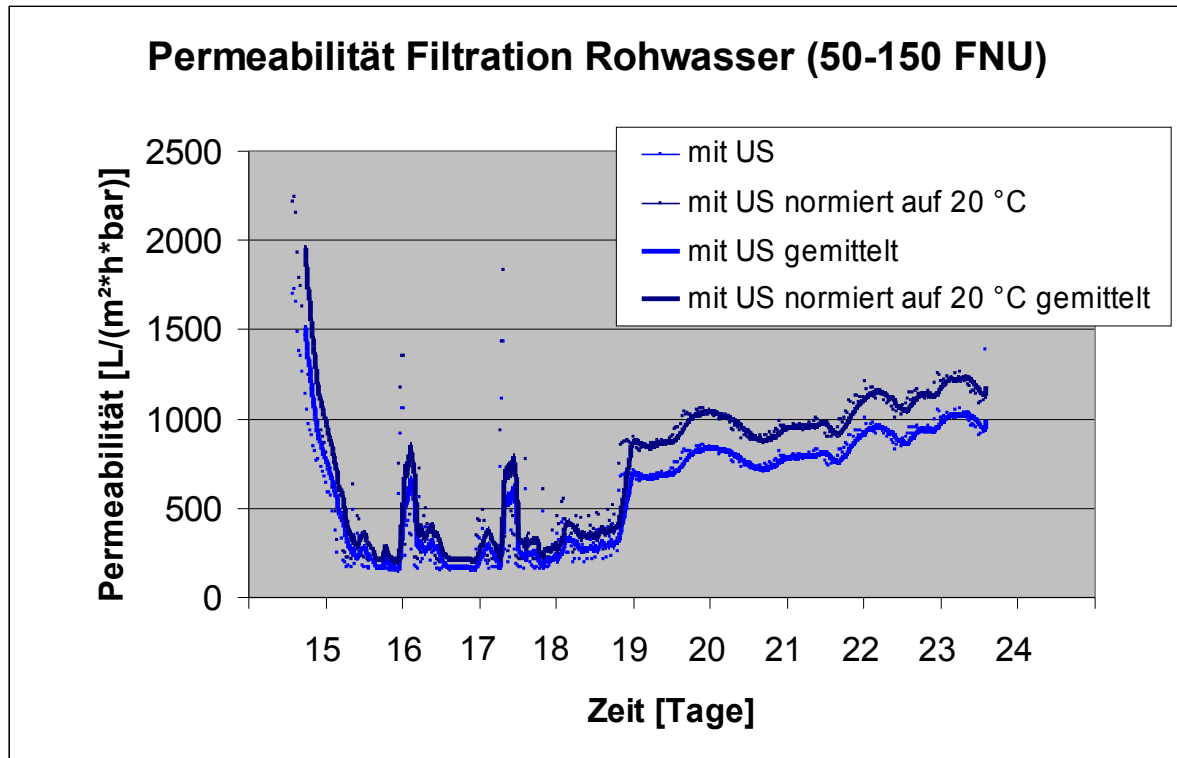


Abbildung 50: Verlauf der Permeabilität während des dritten Versuchsabschnittes der Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach der Relaxationsphase

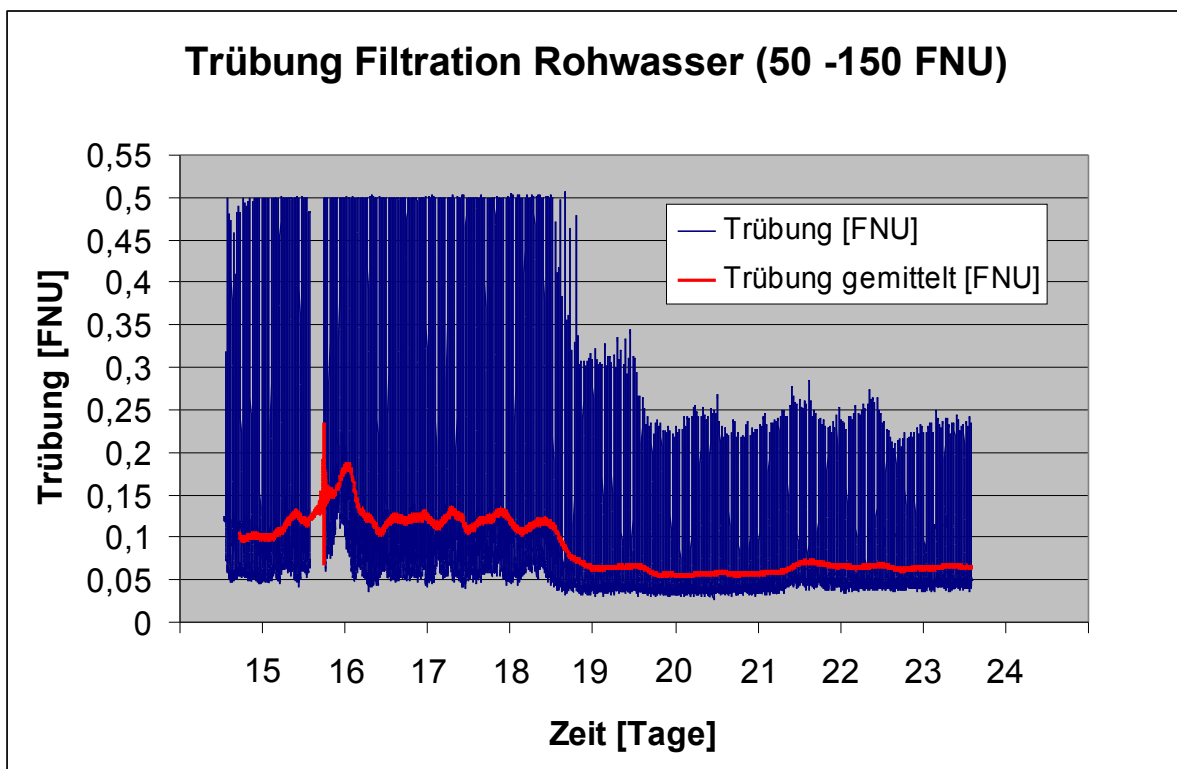


Abbildung 51: Verlauf der Trübung während des dritten Versuchsabschnittes der Filtration von nicht vorgereinigtem Rohwasser nach der Relaxationsphase

Die Versuche mit nicht vorgereinigtem Rohwasser haben gezeigt, dass es möglich ist, mit Hilfe des USL-Verfahrens auch bei starker Trübung einen konstanten Betrieb mit guten Permeabilitätswerten zu erreichen. Wichtig ist auch eine Betriebsweise der Anlage mit konstanter Einstellung der Parameter. Es hat sich bei diesen Versuchen gezeigt, dass ein spezifischer Membranfluss von  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$  optimal ist, sowie eine Filtrationsdauer von 30 Minuten. Höhere spezifische Membranflüsse oder auch kürzere Filtrationsdauern zeigten nicht den gewünschten Erfolg. Auch eine längere Filtrationsdauer zeigte keine Verbesserung.

Als absolut ausreichend erwies sich jedoch eine Rückspüldauer von nur einer Minute und eine Beschallungsdauer von nur 15 sec, die bei diesen Trübungswerten des Rohwassers jedoch mit 4000 Watt Leistung durchgeführt werden muss.

#### 4.3 Bewertung der Ergebnisse der Versuchsreihen

Mit den durchgeführten Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit Hilfe von Ultraschall beachtliche Reinigungserfolge zu erzielen, die einen dauerhaften und konstanten Betrieb einer Membrananlage ganz ohne Einsatz von Reinigungschemikalien ermöglichen.

Dabei hat sich gezeigt, dass alle Parameter (Schallfrequenz, Schallintensität, Beschallungsdauer) bedeutsam sind und sich eine erfolgreiche Betriebsweise nur bei bestimmten Einstellungen ergibt.

Der Reinigungserfolg ist nur in der Schaltung des USL-Verfahrens in genannter Abfolge (Abb. 52) möglich. Alle anderen Kombinationen führten nicht zu dem gewünschten Erfolg.

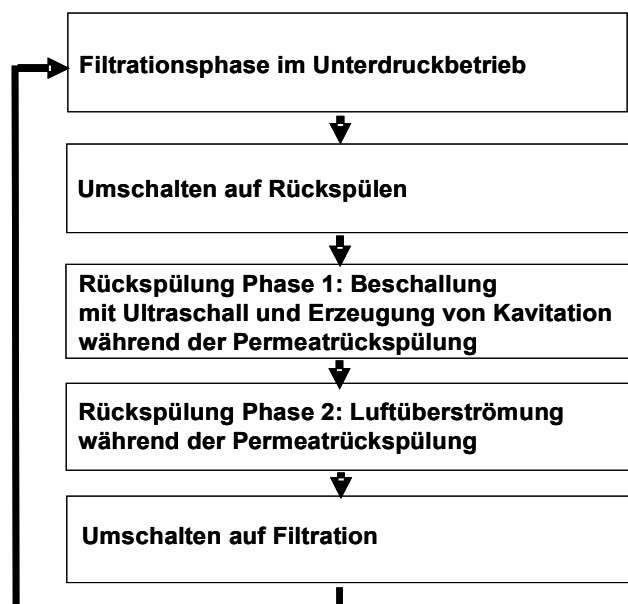


Abbildung 52: Ablaufschema des USL-Verfahrens

Auch die Anordnung von Membranen und Tauchschwingern ist entscheidend. Dieses System funktioniert mit getauchten Membranen. Das hat den Vorteil, dass das System nicht unter Druck steht, wie etwa bei Membranen im Druckrohrsystem. Mit den eingehängten Tauchschwingern ist das Engineering erheblich vereinfacht. Wenn Schallgeber in ein Druckmodul eingebaut werden müssen, ist dies nicht nur erheblich aufwändiger, auch Probleme der Dichtigkeit sind gegeben, neben Gefahren der Membranschädigung. Außerdem wäre der Kostenaufwand zu hoch (nach Aussage des Abschlussberichtes des Verbundprojektes: „In-situ Ultraschallabreinigung für Kleinmembransysteme in der Trinkwasseraufbereitung“, siehe Seite 40).

Daher ermöglichen nur Membranen im getauchten System die hier vorgestellte Betriebsweise mit Ultraschall im USL-Verfahren. Weiterhin bedarf dieses Verfahren rückspülbarer Flach-Membranen.

Ob eine solche Betriebsweise auch mit getauchten und rückspülbaren Kapillarmembranen erfolgreich sein kann, müsste untersucht werden, dergleichen auch, ob andere Membranmaterialien verwendet werden können, wie z.B. Keramikmembranen. Die hier verwendeten polymeren Membranen haben sich als schallweich erwiesen, während Keramikmembranen sich als schallhart erweisen dürften (vgl. Seite 27).

Dass die verwendete Ultraschallfrequenz und der Membranabstand in direktem Bezug zueinander stehen und entscheidend sind, hat die Versuchsreihe mit 35 kHz gezeigt, bei der kein Reinigungserfolg möglich war, weil der Membrantaschenabstand zu gering war, als dass die Schallwellen sich hätten zwischen ihnen ausbreiten können. Nur dann kann zwischen den Membrantaschen auch ein Kavitationsblasenfeld entstehen.

So wäre es denkbar, dass je nach dem Verschmutzungsgrad des zu filtrierenden Rohwassers der Membranabstand entsprechend gewählt wird (bei höherem Verschmutzungsgrad z.B. ein größerer Abstand) und die entsprechende Ultraschallfrequenz ausgewählt wird (bei größerem Membrantaschenabstand z. B. eine niedrigere Frequenz). Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass bei niedrigerer Frequenz die Kavitationsblasen größer sind und die Abreinigung damit gröber und massiver ist. Daher ist zu untersuchen, ob die jeweils verwendeten Membranmaterialien die Standfestigkeit für die verwendete Frequenz aufweisen und der Reinigungserfolg die gewünschten Ziele erreicht.

Um Aussagen über den Reinigungsmechanismus treffen zu können, wurde an der Universität Göttingen (Drittes Physikalisches Institut) ein Modell der Versuchsanlage im Labormaßstab nachgebaut und der Reinigungsprozess mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsvideographie beobachtet, sowie das Schallfeld vermessen.

Es ist festzuhalten, dass während der gesamten im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Versuchsreihen an der Versuchsanlage in Biebesheim, wie auch bei den Versu-

chen der Universität Göttingen keine ultraschallbedingten Membranschäden auftraten, wo frühere Forschungen immer wieder Schäden an ultraschallbehandelten Membranen nachwiesen (Masselin et al., 2001).

Das Membranmodul mit seinen parallel angeordneten Membrantaschen in gleichmäßigem Abstand stellt gleichsam einen Wellenleiter dar, bei dem sich eine Schicht aus Kavitationsblasen in den Zwischenräumen nur ausbilden kann, wenn der Abstand zwischen den Membrantaschen mindestens eine halbe Schallwellenlänge beträgt (siehe Kap. 4.2.6).

Die Schallabstrahlungsflächen der beiden Tauchschwinger befinden sich senkrecht zu den Flächen der Membrantaschen, wobei der Schall parallel zu den Membranflächen eingestrahlt wird. Es entsteht ein Stehwellenfeld dadurch, dass sich die Schallwellen der beiden gegenüberliegenden Tauchschwinger überlagern. Sie sind gegenläufig fortschreitend mit gleicher Frequenz und Amplitude.

Die von Reuter (2009) durchgeführte Vermessung des Schallfeldes am Modul im Labormaßstab mit DIN-A4 großen Membrantaschen zeigt, dass ein großer Teil des Schalls vom Modul reflektiert wird und sich insbesondere um das Modul herum Kavitationsblasenfelder ausbilden. Fingerförmig reichen Gebiete höheren Schalldruckes in die Membrantaschenzwischenräume. Die Kavitationsblasenstrukturen schotten jedoch das Membranmodul ein wenig ab, so dass sich weniger Kavitationsblasen im Membrantaschenzwischenraum befinden. Auch die von Reuter durchgeführte Messung des Kavitationsrauschpegels bestätigt: Das Kavitationsrauschen in den Zwischenräumen der Membrantaschen ist minimal.

Was bewirkt nun aber die Reinigungsleistung?

Die Reinigungsleistung wird durch Kavitationsblasen hervorgerufen, was Reuter 2009 durch Beobachtungen bei hochgeschwindigkeitsvideografischen Aufnahmen feststellen konnte.

Bei der weichen Kavitation können diese Vorgänge durch akustisch hervorgerufene Strömungen oder Blasenpulsationen (oszillierende Blasen) stattfinden. Bei der harten (transienten) Kavitation entstehen Mikrojets und Schockwellen, die stärker erodierend wirken können als Effekte der weichen Kavitation.

Ausgehend von Blasen in den vorderen Bereichen des Membrantaschenzwischenraumes in den fingerförmigen Gebieten höheren Schalldrucks, befinden sich weiter innen zwischen den Membrantaschen kleinere Blasen. Wie auch in den Aufnahmen in Abbildung 29, Seite 64 zu sehen ist, befinden sich bei 130 kHz Blasenschleier zwischen den Membranen. Bei genauerer Untersuchung stellt man fest, dass es sich um eine Schicht aus feinen, kleinen Blasen handelt, die zwischen den Membrantaschen hindurchströmen. Diese kleinen Blasen werden über Strömungen, erzeugt durch den akustischen Strahlungsdruck, in das Innere der Membrantaschenzwischenräume getragen.

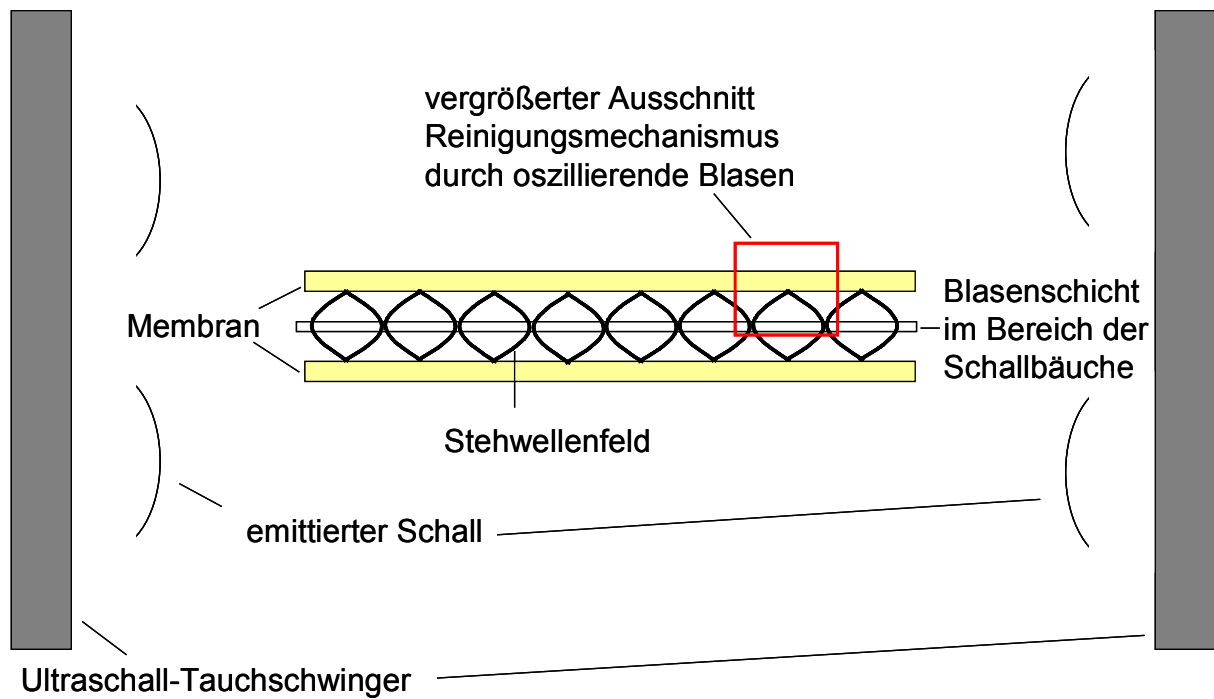
Nun sind die Flächen der schallweichen Membran gleichsam als Knotenebenen des Schallfeldes zu sehen und die Schallbäuche befinden sich zwischen den Membranen. Die feinen, in die Membranzwischenräume eingetragenen Kavitationsblasen sammeln sich im Bereich der Bäuche, wo sie die oben erwähnte Blasenschicht bilden. Diese Anordnung folgt damit der primären Bjerkneskraft, demzufolge im Stehwellenfeld die kleinen Blasen von den Schallbäuchen angezogen werden und die großen Blasen von den Schallknoten. Durch Aufschwimmen und Vereinigung mit anderen Gasblasen wachsen die kleineren Blasen der Blasenschicht zwischen den Membrantaschen soweit an, bis sie den Minnaert-Resonanzradius von  $23\text{ }\mu\text{m}$  bei  $130\text{ kHz}$  erreicht haben. Diese verlassen nun die Blasenschicht gemäß der primären Bjerkneskraft und wandern in den Bereich der Schallknoten auf der Membranoberfläche, wo sie sich stark oszillierend bewegen. Hier lagern sie sich bevorzugt in kleinen Vertiefungen an und „knabbern“ gleichsam die Deckschicht an den Kanten ab und emulgieren diese. Die emulgierte Deckschicht wird nach dem Abreinigungsprozess mit der zwischen den Membrantaschen befindlichen strömenden Blasenschicht ausgetragen. Diesen Vorgang konnte Reuter (2009) in hochgeschwindigkeitsvideographischen Beobachtungen feststellen.

Dabei liegen die kleinsten Blasen auf den Membranoberflächen im Bereich der Minnaert-Resonanzgröße. Durch Vereinigung mit Entgasungsblasen auf der Membranoberfläche gibt es auch größere Blasen, die aber deutlich geringere Bewegungsgeschwindigkeiten aufweisen. Eine Blase des Durchmessers  $600\text{ }\mu\text{m}$  bewegt sich im Schallfeld mit nur  $15\text{ cm/s}$ , eine Blase des Durchmessers  $80\text{ }\mu\text{m}$  dagegen mit  $5\text{ m/s}$ . Da die größeren Blasen weniger Beschleunigungen unterworfen sind und sich gleichförmiger und langsamer bewegen, wird davon ausgegangen, dass die hauptsächliche Reinigungsarbeit von den kleinen Blasen ausgeführt wird. Die Beobachtung einer  $50\text{ }\mu\text{m}$  großen Blase zeigte, dass sie sich lokal begrenzt in zitternden Bewegungen mit stark wechselnden Geschwindigkeiten über einige Zentimeter der Oberfläche bewegt. Über kurze Distanzen ( $10\text{ }\mu\text{m}$ ) konnten dabei Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Sekunde gemessen werden. Für Blasen dieses Durchmessers ließen sich Reinigungsbreiten von  $15\text{ }\mu\text{m}$  abschätzen (Reuter, 2009).

In den Blasenschichten werden sekundäre Bjerkneskräfte wirksam. Dadurch ziehen sich Blasen gleichen Durchmessers gegenseitig an, stoßen sich häufig zunächst auch erst wieder ab. Dadurch erreichen sie deutlich höhere Bewegungsgeschwindigkeiten als isolierte Blasen.

Die Abbildungen 53 a und b verdeutlichen schematisch, wie sich das Schallfeld zwischen den Membranen anordnet und wie man sich den Reinigungsmechanismus durch aufsteigende Blasen in Minnaert-Größe vorstellen kann.





### Schallfeld zwischen 2 Membrantaschen

Abbildung 53 a): Modell des Schallfeldes als Stehwellenfeld zwischen zwei Membrantaschen  
Die Blasenschicht befindet sich im Bereich der Schallbäuche, der Bereich der Schallknoten befindet sich auf den Membranoberflächen

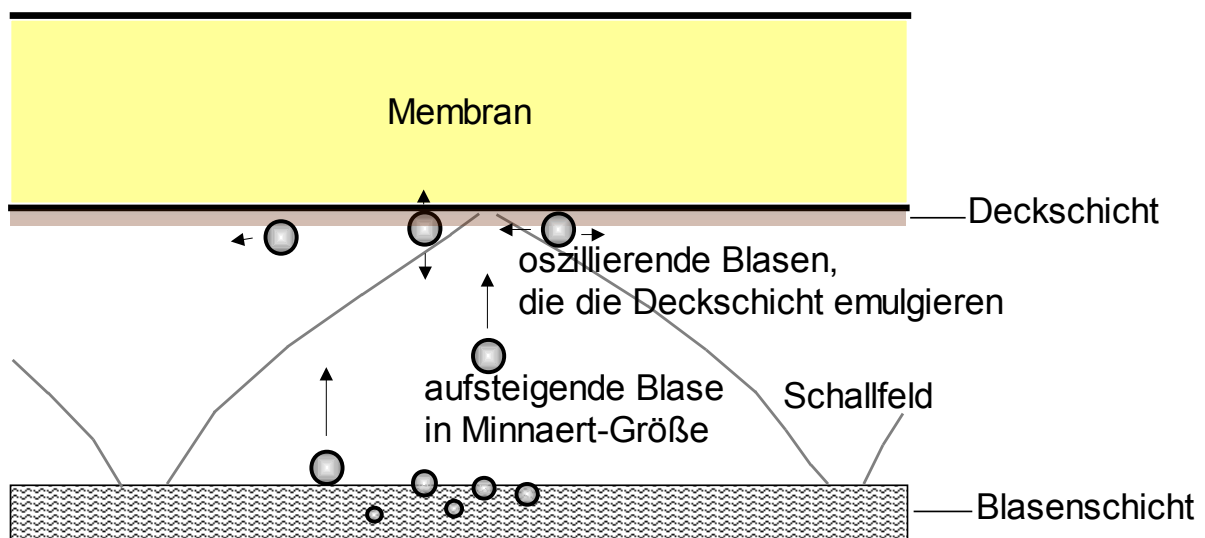


Abbildung 53 b): Schema des Reinigungsmechanismus durch oszillierende Blasen in Minnaert-Größe, gemäß des Ausschnittes aus Abb. 53 a.

Die Beobachtungen zeigen eindeutig, dass die Membranoberfläche durch weiche Kavitation gereinigt wird. Man könnte diesen Reinigungsmechanismus auch als durch wandernde Blasenpulsationen hervorgerufen bezeichnen. Es erklärt damit auch das Ausbleiben von Schädigungen der Membranoberflächen. Hier wird ersichtlich, dass auch weiche Kavitation zu sehr guten Reinigungsergebnissen führen kann, dass sie sogar erforderlich ist, wenn es sich um besonders empfindliches Reinigungsgut handelt.

Eine wichtige Beobachtung ist auch die, dass die Membran schallweich reagiert. Mikrojets treffen mit der Spitze, ihrem Flüssigkeitsstrahl, auf schallharten Begrenzungen auf und können dabei Erosionswirkung haben. Bei schallweichen Flächen ist ihr Flüssigkeitsstrahl dagegen von der Fläche abgewandt.

Nach Reuter (2009) gibt es eine Erklärung für den niedrigen Schalldruck in den Membranzwischenräumen: „In der Blasenschicht zwischen den Membrantaschen sind fast alle Blasengrößen in Schallausbreitungsrichtung vorhanden. Das könnte wie ein Breitbandabsorber wirken.“ Und warum außerdem wenig Kavitationsaktivität gemessen wird: „Nicht zu stark getriebene Blasen in größeren Blasenwolken emittieren meist harmonischen Schall und absorbieren rasch Stoßwellen ebenso wie die Membran“.

Bei höherer Ultraschall-Leistung nehmen die Strömungen und Blasendichten auch im Membrantaschenzwischenraum stark zu. Durch Verstärkung der sekundären Bjerkneskräfte wird die in dem Membrantaschenzwischenraum befindliche Blasenschicht stärker. Jedoch ergibt sich bei höheren Leistungen ein Effizienzabfall, u.a. deshalb, weil sich die Blasenwolken rund um das Membranmodul verdichten und das Modul stärker abschotten, als auch die Blasenstreamer hohe Drücke meiden und daher von den Schalldruckmaxima vor dem Membranmodul abgelenkt werden.

Unter 800 Watt Ultraschall-Leistung konnte kein Reinigungserfolg festgestellt werden, vermutlich weil erst bei höherer Leistung Kavitation auftritt.

Ab etwa 70% (entsprechend 2800 Watt) der Schall-Leistung konnte beobachtet werden, dass sich auch ein Stehwellenfeld der doppelten Frequenz der anregenden Schallschwingung zwischen den Membrantaschen ausbildet (Reuter 2009). Die Ursache sind nichtlineare Blasenschwingungen bei akustischer Kavitation (Esche 1952) und die Randbedingungen durch die Membrantaschen.

Beobachtungen der Versuchsanlage Biebesheim zeigten, dass bei wenig verschmutzten Membranen und relativ sauberem Rohwasser eine Ultraschall-Leistung von 2000 Watt ausreicht, um gute Reinigungsergebnisse zu erzielen. Jedoch wurden höhere Leistungen bei stärkerer Deckschichtbildung durch stark verschmutztes Rohwasser notwendig. Durch die starke Trübung im Rohwasser wird dabei der Schall vermehrt absorbiert. Um ausreichende Blasenschichten in den Membrantaschenzwi-

schenräumen zu erzeugen und eine Intensivierung der Reinigungsvorgänge zu erreichen, ist daher eine höhere Leistung (100% entsprechend 4000 Watt) notwendig.

Die im Rahmen dieser Arbeit festgestellte Qualitätsverbesserung des Permeates bei der deckschichtkontrollierten Filtration lässt sich wie folgt erklären. In Übereinstimmung mit Reuter, der eine Emulgierung abgereinigter Deckschichtsubstanz feststellen konnte, war zu beobachten, dass sich im Filtrationstank der Membran mit Ultraschallbehandlung wesentlich kleinere, feiner dispers verteilte Partikel befanden, als im Filtrationstank ohne Ultraschall-Behandlung. Beim Filtrationsvorgang werden diese Partikel zum Teil wieder auf den Membranoberflächen abgelagert und bilden durch geringere Partikelgrößen eine feinporigere Membranoberfläche, die einen verbesserten Rückhalt ermöglicht. Mit zur Qualitätsverbesserung hat aber sicherlich auch die durch gute Abreinigung der Membranen erhaltene höhere Permeabilität beigetragen. Der für eine entsprechende Literleistung zu erbringende Unterdruck war damit geringer, so dass auf die auf der Oberfläche der Membranen haftenden Partikel eine geringere Sogwirkung ausgeübt wird. Somit werden weniger Schmutzpartikel durch die Membran befördert.

Bei mikroskopischen Untersuchungen von Deckschichten auf Membranoberflächen konnten bei nicht beschallten Membranen kleine 100-600 nm große dunkle Punkte gesichtet werden, die bei der mit Ultraschall gereinigten Membran praktisch nicht zu finden waren. Reuter geht davon aus, dass es sich aufgrund von Farbe und Membranporengröße um verstopfte Membranporen handelt. Er vermutet, dass die Mikroströmungen ultraschallgetriebener Blasen bis zu den Poren reichen und eine Verstopfung dieser verhindern.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die mit Ultraschall behandelte Membran in den Versuchsläufen durch höhere Permeabilität grundsätzlich mit geringerem Unterdruck lief. Auch dadurch ist die Gefahr von Porenverblockungen deutlich geringer, da die Partikel von der Membran schwächer angezogen werden. Die Ergebnisse in Abbildung 25, Seite 60 zeigen, dass das Permeat in Abhängigkeit vom Unterdruck reagiert und bei geringerem Unterdruck qualitativ deutlich besser ist. Diese Beobachtung konnte entlang sämtlicher Versuchsreihen gemacht werden. Somit ist im Hinblick auf die Permeatqualität immer zu versuchen, den Unterdruck so gering wie möglich zu halten.

Bei der manuellen Abreinigung der Membranmodule der Versuchsanlage im November 2006 konnte festgestellt werden, dass die Deckschicht bei der mit Ultraschall behandelten Membran sehr leicht entfernt werden konnte, während bei der nicht mit Ultraschall behandelten Membran die Deckschicht deutlich stärker anhaftete und schwer zu entfernen war. Bei anschließendem erneuten Einsatz zeigte sich bei der mit Ultraschall behandelten Membran ein etwas geringerer Leistungsverlust.

Somit kann mit Hilfe des Ultraschalls nicht nur die Deckschichtbildung kontrolliert werden, sondern auch die sterische Porenverblockung verhindert und die Permeatqualität verbessert werden.

Schäden an den Membranen waren weder bei mikroskopischer Untersuchung feststellbar, noch bei den Durchlaufversuchen oder Blasentests der Membran.

Es ist zu erwarten, dass die Funktionsdauer der Membran dadurch erheblich verlängert werden kann, was sich hier gegenüber der Vergleichsmembran ohne Ultraschallbehandlung bereits deutlich zeigte.

Lediglich im Bereich der Membrankanten (Verklebungen, Vernähtungen) war die Gefahr des Aufgehens der Membrantaschen gegeben. Ob dies durch das oftmalige Rückspülen im Betrieb bedingt war oder durch an den Membrankanten angreifende Blasenstrukturen (wie bei Reuter beobachtet und durch starke Rückspülpeaks bei den 35 kHz-Versuchen zu vermuten), ist nicht zu sagen. Jedoch wäre dieses Problem durch Verbesserungen am Membranmodul seitens des Herstellers leicht zu beheben. Man könnte eine flache, lineare, halbgebogene Kunststoffkappe auf die Kanten aufsetzen und diese damit schützen und zusammenhalten.

Mit Hilfe einer noch höheren Frequenz als 130 kHz wäre der Minnaert-Radius der Blasen entsprechend kleiner (Tab. 4). Wie beobachtet werden konnte, sind vornehmlich die kleineren Blasen der weichen Kavitation für die Abreinigungsprozesse verantwortlich, da sie sich schneller bewegen. Sind diese noch kleiner, können sie sich noch schneller bewegen. Bei einer höheren Frequenz wäre auch die halbe Wellenlänge  $\lambda/2$  kleiner. Das würde bedeuten, dass die Packungsdichte der Membranen erhöht werden kann und der Schall trotzdem in den Membrantaschenzwischenraum gelangen kann. Allerdings ist es möglich, dass eine höhere Schallleistung erforderlich wird. Das ist in Experimenten in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad der zu reinigenden Flüssigkeit zu ermitteln.

Somit könnte jedoch ein effektives Membranreinigungssystem auch auf kleinerem Raum betrieben werden, was zu einem geringeren Platzbedarf führt.

Mit Hilfe der Minnaertschen Formel (aus Kuttruff: Physik und Technik des Ultraschalls, Formel XII.20) kann unter den gesetzten Normbedingungen von:

Atmosphärendruck  $p$ : 1 bar entsprechend  $10^5 \text{ N/m}^2$

Dichte des Wassers  $\rho$ :  $1000 \text{ kg/m}^3$

Polytropenexponent des Gases in der Blase (in diesem Fall Luft)  $\kappa$ : 1,4

die vereinfachte Formel:

$$f \cdot R = 3,23 \text{ mm} \cdot \text{kHz}$$

mit

$f$  = Frequenz

$R$  = Resonanzradius der Blase bei gegebener Frequenz

zur Berechnung von Minnaert-Resonanzradien von Blasen bei einer bestimmten Anregungsfrequenz angewandt werden.

Für eine Frequenz von 35 kHz ergibt sich ein Minnaert-Resonanzradius der Blase von 92  $\mu\text{m}$ . Bei einer Frequenz von z.B. 500 kHz wären dies nur noch 6,5  $\mu\text{m}$ .

Die Tabelle 4 zeigt, wie groß bei gegebenen Frequenzen die Minnaert-Radien der Blasen sind, die als kleinste Blasen auf die Membranoberflächen (Knotenebene des Schalls) treffen würden und dort oszillieren und wie groß der Membrantaschenabstand gemäß  $\lambda/2$  sein müsste, damit sich das Schallfeld optimal zwischen den Membrantaschen ausbreiten kann.

Tabelle. 4: Resonanzradius und optimaler Membrantaschenabstand in Abhängigkeit von der Frequenz

Frequenz [kHz]	Resonanz-Radius [ $\mu\text{m}$ ]	Membrantaschenabstand ( $\lambda/2$ ) für 20°C [cm]
10	323	14,8
20	162	7,42
25	129	5,94
35	92	4,24
70	46	2,12
130	25	1,14
260	12	0,57
500	6,5	0,3
1000 (=1MHz)	3,2	0,15

Es kann davon ausgegangen werden, dass beim für 35 kHz passenden Membrantaschenabstand auch hier eine schadenfreie Reinigung möglich ist, da die Membran durch oszillierende Blasen (weiche Kavitation) gereinigt wird. Dies ist solange der

Fall, wie die Membran schallweich reagiert, d.h. die Schallkennimpedanz der Membran gegenüber dem zu filtrierenden Medium (hier Wasser) niedriger ist.

Bei den Experimenten mit der Versuchsanlage zeigte sich, dass auch bei 35 kHz die Membran nicht irreversibel geschädigt wurde.

Dennoch ist die Schadenfreiheit der Membran bei Anwendung entsprechender Frequenz mit passendem Membrantaschenabstand in einem Versuchsaufbau zu überprüfen.

Membrantaschenabstände über 2-3 cm dürften in der Regel uninteressant sein, es sei denn, es werden stark verschmutzte oder hochviskose Flüssigkeiten filtriert.

Bei Membranabständen unter 0,5-1 cm dürften bei den polymeren Membranen durch variierende Formstabilität Schwierigkeiten auftreten. Hier müssten zumindest Abstandshalter die Membranen fixieren, aber durch die Flexibilität der Membranen sind dennoch Grenzen gesetzt.

Einzig bei harten Membranen (z.B. keramische Membranen) wären somit sehr geringe Abstände möglich. Die Voraussetzung für diesen Reinigungsmechanismus wäre aber eine schallweiche Reaktion des verwendeten Membranmaterials in der zu filtrierenden Lösung.

Bei den hier eingesetzten polymeren Membranen sollten also ungefähr Frequenzen von 70-260 kHz genutzt werden (in Tab. 4 gelb unterlegt).

Aus dem hier errechneten Optimalwert für den Membrantaschenabstand ergibt sich ein weiteres geringfügiges Optimierungspotential.

Der bei der Versuchsanlage eingesetzte Membrantaschenabstand betrug 1,25 cm. Stattdessen könnten gemäß Berechnung von  $\lambda/2$  1,14 cm eingesetzt werden.

Das würde bei dem verwendeten Membranmodul BC-10 die Dicke des Membranstapels um 2,1 cm reduzieren, das wären 8,8% des Membranstapels. Die Volumensparnis läge bei 7444 cm<sup>3</sup>.

#### **4.4 Energetische Betrachtung, Einsparpotential**

Bei Reinigungsanwendungen mit Hilfe von Ultraschall steht immer wieder der aufzuwendende Energieeinsatz im Fokus. Damit ein Verfahren wirtschaftlich sein kann, darf der Energieverbrauch nicht zu hoch sein.

Der Energieverbrauch des Ultraschalls beschränkt sich bei diesem Verfahren auf eine kurze Anschaltphase während des Rückspülprozesses.

In den folgenden Betrachtungen wird nur der Energieverbrauch für den Ultraschalleinsatz angegeben. Für die Luftblasenüberströmung, sowie für Pumpen etc. ist weitere Energie erforderlich.

Der Energieverbrauch für den Ultraschall wird hier im Verhältnis zum gewonnenen Permeat angegeben. Dementsprechend ist für ihn der spezifische Membranfluss in  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , die Filtrationsdauer, die Rückspüldauer, die Beschallungsdauer während der Rückspülphase und die eingestellte Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger von Bedeutung.

### **Beispiel 1:**

Filtration zu Beginn:

spezifischer Membranfluss: ( $A = 10 \text{ m}^2$ ) mit  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Filtrationsdauer: 30 min

Rückspüldauer: 2 min (mit  $Q = 60 \text{ L/h}$ )

Beschallungsdauer während Rückspülung: 1 min

Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger: 100% entsprechend 4000 Watt

Es ergibt sich ein Wert von  $0,68 \text{ kWh}/\text{m}^3$  erzeugtes Permeat für die Ultraschallanwendung.

### **Beispiel 2:**

Bei den Versuchen mit unterschiedlicher Beschallungsdauer (siehe Kap. 4.2.7) konnte festgestellt werden, dass auch eine Beschallungsdauer von 30 sec anstelle von einer Minute das gleiche Reinigungsergebnis bringt. Damit konnte der Energiebedarf für den Ultraschall halbiert werden (Energieeinsparung von 50%).

spezifischer Membranfluss:  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Filtrationsdauer: 30 min

Rückspüldauer: 2 min

Beschallungsdauer während Rückspülung: 30 sec

Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger: 100% entsprechend 4000 Watt

Es ergibt sich ein Wert von  $0,34 \text{ kWh}/\text{m}^3$  erzeugtes Permeat für die Ultraschallanwendung.

### **Beispiel 3:**

Bei sehr sauberem zu filtrierenden Wasser und nicht belegter Membran lässt sich auch ein spezifischer Membranfluss von  $50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  dauerhaft realisieren. Weiterhin kann die Rückspüldauer halbiert werden und 50% Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger entsprechend 2000 Watt sind vollständig ausreichend.

spezifischer Membranfluss:  $50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Filtrationdauer: 30 min

Rückspüldauer: 1 min

Beschallungsdauer während Rückspülung: 30 sec

Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger: 50% entsprechend 2000 Watt

Es ergibt sich ein Wert von  $0,067 \text{ kWh}/\text{m}^3$  erzeugtes Permeat für die Ultraschallanwendung.

### **Beispiel 4:**

Bei der Filtration von stärker trübstoffhaltigen Wässern ab etwa 60 FNU aufwärts ist nur noch ein spezifischer Membranfluss von  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  möglich und der Ultraschalleinsatz bei einer Leistung der Tauchschwinger von 100% entsprechend 4000 Watt ist notwendig, um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten. Erstaunlicherweise ließ sich die Beschallungsdauer auf 15 sec reduzieren und brachte trotzdem zuverlässige Reinigungsergebnisse.

spezifischer Membranfluss:  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Filtrationdauer: 30 min

Rückspüldauer: 1 min

Beschallungsdauer während Rückspülung: 15 sec

Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger: 100% entsprechend 4000 Watt

Es ergibt sich ein Wert von  $0,168 \text{ kWh}/\text{m}^3$  erzeugtes Permeat für die Ultraschallanwendung.



### Beispiel 5:

Abschließend kann selbstverständlich angenommen werden, dass auch für Beispiel 3 die Beschallungsdauer von 15 sec ausreichend ist. Das führt zu einer weiteren Energieersparnis und entspricht damit dem minimalen Energieeinsatz für den Ultraschall bei dieser Anlagenkonfiguration.

spezifischer Membranfluss: 50 L/(m<sup>2</sup>•h)

Filtrationsdauer: 30 min

Rückspüldauer: 1 min

Beschallungsdauer während Rückspülung: 15 sec

Leistung der Ultraschall-Tauchschwinger: 50% entsprechend 2000 Watt

Es ergibt sich ein Wert von 0,034 kWh/m<sup>3</sup> erzeugtes Permeat für die Ultraschallanwendung.

Die Energiebedarfszahlen für den Ultraschall ergeben sich für die Konfiguration der hier beschriebenen Versuchsanlage. Weiteres Optimierungspotential ist hier denkbar. Das Stehwellenfeld reichte bei den Versuchen bis in die Mitte des Membranmoduls hinein. Verdoppelt man die Tiefe der Membranmoduls, könnte die doppelte Membranfläche bei gleicher Auslegung der Ultraschall-Tauchschwinger erhalten werden. Das würde zu einer Halbierung des Energiebedarfs bei den in den obigen Beispielen genannten Anlageneinstellungen führen. Allerdings ist die Funktion einer solchen Konfiguration anhand eines Prototyps mit entsprechenden Versuchsreihen nachzuweisen.

Einsparung bei der Pumpleistung der Saugpumpen könnte geleistet werden, indem die Versuchsanlage mit höherem Wasserüberstau betrieben wird. Die Saugpumpen, die während des Filtrationsbetriebs laufen, brauchen den Hauptteil der Gesamtenergie. Würde man die Anlage ausschließlich mit Wasserüberstau betreiben, ließe sich etwa die Hälfte an Energie einsparen (siehe dazu die Berechnungen in Kapitel 5 zur Solar/Wind- Membrananlage).

Der Energiebedarf für das Gebläse wird nur über die Verkürzung der Rückspüldauer von 2 Minuten auf eine Minute reduziert. Im USL-Verfahren läuft es bei 30 sec Beschallungsdauer 30 sec, bei 15 sec Beschallungsdauer 45 sec. Der Energiebedarf des Gebläses wurde nicht gemessen, ergibt sich aber rechnerisch zu 2,5 Wh bei 30 sec Laufzeit und 7,5 Wh bei 90 sec Laufzeit.

## **5. Solar-Wind betriebene, autarke Anlage – Ein Modell**

Vorstellbar ist es, auch eine Membrananlage in Gebieten zu betreiben, die keinen Stromanschluss besitzen, sie also energetisch autark zu betreiben. Das kann für Notfalleinsätze sinnvoll sein oder auch in Gebieten, die eine geringe Infrastruktur aufweisen und keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben.

Diese Modellrechnung soll dabei auf der Konfiguration der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsanlage basieren. Sie ist mit einem getauchten Membranmodul (BC 10) ausgestattet und zwei Tauchschwingern in der Ausführung wie in der Versuchsanlage. Sie soll mit Hilfe von Solarzellen und einem Windgenerator betrieben werden. Dazu werden weiterhin Akkumulatoren mit einer hohen Kapazität benötigt, da die Ultraschallanwendung kurzzeitig hohe Stromflüsse erfordert.

### **5.1 Aufbau der Anlage**

Wie oben erwähnt, enthält die Anlage ein Membranmodul BC-10 (Fa. Microdyn-Nadir) mit gleichem Membrantyp (Ultrafiltration), weiterhin zwei Tauchschwinger nebst Generator (Fa. Elma) in gleicher Auslegung mit jeweils 48 Schallwandlern und einer Gesamtleistung von 4000 Watt. Genauso enthält sie ein Gebläse (Rietschle DTE 8), eine Befüllungspumpe (Wilo) und eine Saugpumpe (Netzsch-Mohnpumpe), deren Förderrichtung reversierbar ist, damit sie gleichzeitig für die Rückspülung verwendet werden kann. Zur weiteren Ausstattung gehören, analog zu der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsanlage, eine Steuerung über SPS 7 nebst Ventilen, Umwälzpumpe, Durchflussmesser, Druckmesser, Temperaturfühler, Wasserstandsfühler, Trübungsmessgerät (Lange), etc.

Um Saugpumpleistung zu sparen, wird die Anlage mit größerem Wasserüberstau als die Versuchsanlage betrieben. Ausgewählt wird hier ein Meter Wasserüberstau. Ein Meter Wassersäule übt dabei einen Druck von 0,1 bar aus, entsprechend -100 mbar während der Filtration. So kann bei guter Permeabilität der Membranen und nicht zu hohem spezifischen Membranfluss Beaufschlagung, überwiegend ohne Pumpleistung während des Filtrationsbetriebes gearbeitet werden, was einen Hauptteil an Energie einspart.

Anders bei dieser Anlage gegenüber der Versuchsanlage ist, neben der Einstraßigkeit, insbesondere ihre Energieversorgung. Dazu wird die Anlage mit Bleibatterien hoher Kapazität ausgestattet, wie z.B. Varta PROMotive Black mit 200 Ah und einem Kälteprüfstrom von 1050 Ampère. Solche Batterien stellen derzeit die kostengünstigste Variante einer standfesten und belastbaren Batterie für diese Anwendung dar.

Auch spezielle Solarbatterien sind in der Regel Bleiakkumulatoren, die optimiert sind auf besonders hohe Lebensdauer, Zyklenfestigkeit und das Verhalten bei tiefer Entladung. Eine zyklensichere Batterie, wie sie bei dieser Art der Anlage benötigt wird, zeichnet sich durch mit Glasmatten unterstützte Separatoren und relativ dicke Platten aus und haben damit in Lade-/Entladezyklen gemessen eine etwa doppelt so hohe Lebensdauer wie Standardbatterien. Die zyklensichere Starterbatterie mit Taschenseparatoren und Vliesauflage hat dabei eine noch höhere Gebrauchsdauer (Robert Bosch GmbH, 2007).

Da die Komponenten dieser Anlage generell mit 230 Volt betrieben werden, müssen die 12 Volt Gleichstrombatterien (DC) mit Hilfe eines Spannungswandlers in 230 Volt Wechselstrom (AC) transferiert werden. Über den Spannungswandler müssen aus der Batterie die nötigen Strommengen, auch bei Spitzenanforderungen, zur Verfügung gestellt werden.

Versorgt werden die Batterien durch Solarenergie. Dazu werden Solarmodule mit einer für den Energiebedarf erforderlichen Fläche benötigt. Für die Anwendung im Außenbereich sollten sie schlaggeschützt (z.B. hagelsicher) sein. Es gibt derzeit drei verschiedene Formen, das Silizium in den Solarmodulen zu verarbeiten. Dies sind monokristalline, polykristalline und amorphe Solarmodule. Sie haben unterschiedliche Wirkungsgrade (nach Brockhaus, 2006): monokristalline einen Wirkungsgrad von 18-23%, polykristalline von 15-18% und amorphe von 10-16%. Polykristalline Module sind in der Regel preiswerter, da sie nicht ganz so aufwändig zu fertigen sind wie monokristalline, letztere sind dafür aber leistungsfähiger. Zwischen die Solarzellen und die Batterien wird ein Laderegler eingefügt, der für eine gleichmäßige Ladung der Batterien sorgt, sowie sie vor Überspannung schützt.

Da in Regionen, die weniger Sonneneinstrahlung aufweisen, zu viel Fläche an Solarzellen benötigt würde, ist es hier hilfreich, eine Windkraftanlage zur Energieergänzung zu integrieren. Diese kann auch nachts Strom erzeugen.

Bei hohem Trinkwasserbedarf kann für den Notfall auch ein Notstromaggregat angeschlossen werden, was aber weniger nachhaltig ist und daher nur in Notlagen, die dessen Einsatz rechtfertigen, eingesetzt werden sollte.

Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 54 zu sehen.

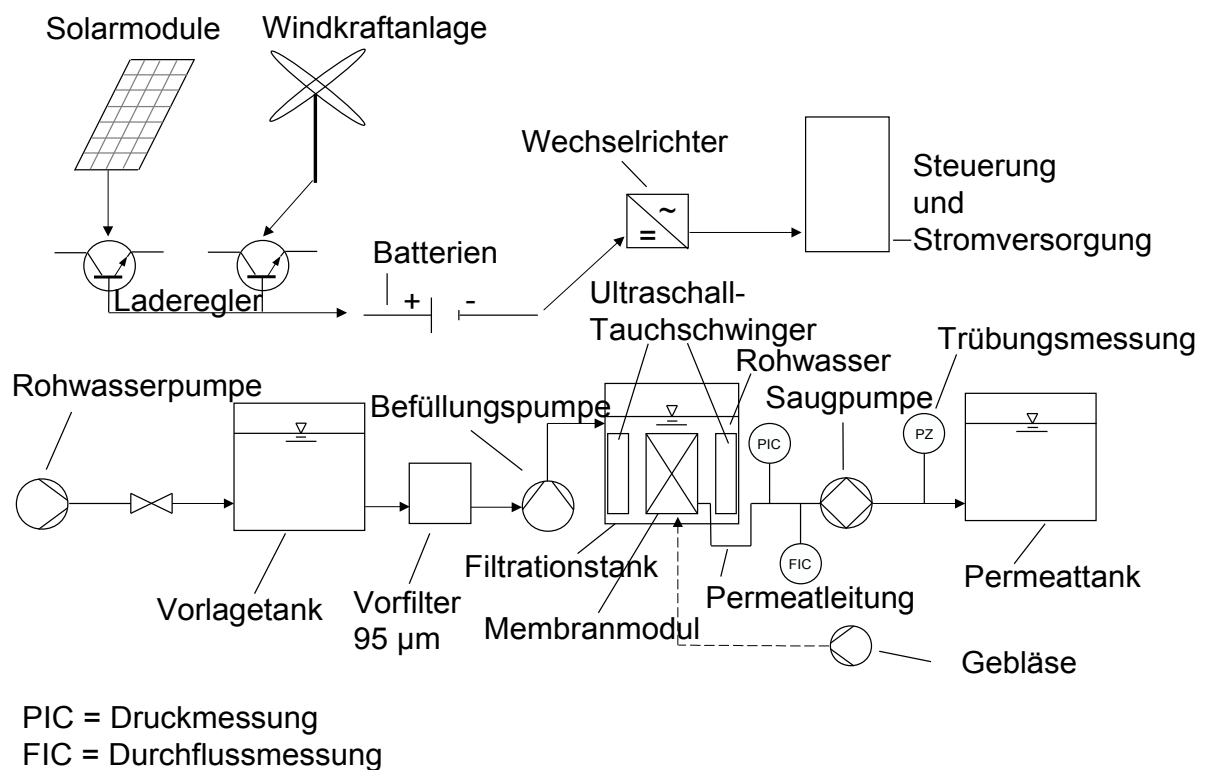


Abbildung 54: Anlagenaufbau der Solar-Wind betriebenen Anlage

## 5.2 Berechnungen

Für die Bemessung der Komponenten, die der Stromversorgung dienen, ist die Leistung in Watt und der Energiebedarf der Anlage in Wattstunden (Wh) zu berechnen. Wichtig dafür sind ebenfalls die maximalen Stromflüsse in Ampère.

Für die Auslegung ist jeweils der maximale Energiebedarf, bzw die maximale Leistung einzusetzen, ansonsten würde die Energieversorgung für den Lastfall nicht ausreichen und die Anlagenleistung müsste gedrosselt werden. Ebenso wichtig ist der Spitzenstromfluss in Ampère, da bei zu hohem Stromfluss das System abschalten würde bzw. die Auslegung der Stromversorgung (Batterien) entsprechend gewählt werden muss.

Dafür wird ein Filtrationszyklus mit den gewonnenen Erkenntnissen der Versuchsanlage verwendet. Dieser besteht aus 34 Minuten, bevor er sich wiederholt, das heißt 30 min Filtration, 1 min Relaxationspause, 2 min Rückspülung und wieder 1 min Relaxationspause, bevor der erneute Filtrationszyklus einsetzt.

Einteilen lässt sich der Filtrationszyklus in 5 Phasen, wobei die jeweils gleichen Phasen denselben maximalen Energiebedarf aufweisen. Der Energiebedarf wird dabei den jeweiligen Anlagenkomponenten entsprechend ihrer Laufzeit zugeordnet. 5 Phasen ergeben sich, da die Rückspülphase in zwei Phasen geteilt wird: in der Phase des Ultraschalleinsatzes wird ein deutlich höherer Stromfluss benötigt als in der Phase der Luftblasenüberströmung.

In Tabelle 5 sind die elektrischen Daten der Anlagenkomponenten und ihre Laufzeiten aufgeführt. Die Saugpumpe sowie die Rückspülpumpe sind ein- und dieselbe Pumpe, sie ist jedoch aus Energieberechnungsgründen entsprechend der jeweiligen Funktion einzeln aufgeführt. Für die Steuerung ist ein Pauschalwert veranschlagt worden, der neben der Steuerung auch die angesteuerten Komponenten und Niederigverbraucher beinhaltet.

Tabelle 5: Elektrische Daten und Laufzeiten der Anlagenkomponenten

<b>Verbraucher</b>	<b>Spannung [V]</b>	<b>Leistung [W]</b>	<b>Strom [A]</b>	<b>max. Laufzeit je Zyklus [sec]</b>
Ultraschallanwendung	230	4000	17,39	30
Gebläse	230	300	2,5	90
Saugpumpe	230	474	2,06	1800
Rückspülpumpe	230	474	2,06	120
Befüllungspumpe	230	391	1,7	180
Umwälzpumpe	230	42	0,18	2040
Steuerung	230	200	0,87	2040

Tabelle 6: Energiebedarf in Phase 1 (Filtrationsphase) und maximale Stromflüsse

<b>Verbraucher</b>	<b>Strom [A]</b>	<b>Leistung [W]</b>	<b>Laufzeit [min]</b>	<b>Energieverbrauch je Zyklus [Wh]</b>
Ultraschallanwendung				
Gebläse				
Saugpumpe	2,06	474	30	237
Rückspülpumpe				
Befüllungspumpe	1,7	391	3	19,6
Umwälzpumpe/Steuerung	1,15	242	30	121
gesamt (Spitzenlast)	<b>4,91</b>	<b>1107</b>		<b>377,6</b>

Tabelle 7: Energiebedarf in Phase 2 und 5 (Relaxationsphase) und maximale Stromflüsse

<b>Verbraucher</b>	<b>Strom [A]</b>	<b>Leistung [W]</b>	<b>Laufzeit [min]</b>	<b>Energieverbrauch je Zyklus [Wh]</b>
Ultraschallanwendung				
Gebläse				
Saugpumpe				
Rückspülpumpe				
Befüllungspumpe				
Umwälzpumpe/Steuerung	1,15	242	1	4
Gesamt (Spitzenlast)	<b>1,15</b>	<b>242</b>		<b>4</b>

Tabelle 8: Energiebedarf in Phase 3 (Rückspülung mit Ultraschall) und maximale Stromflüsse

<b>Verbraucher</b>	<b>Strom [A]</b>	<b>Leistung [W]</b>	<b>Laufzeit [min]</b>	<b>Energieverbrauch je Zyklus [Wh]</b>
Ultraschallanwendung	17,39	4000	0,5	33,34
Gebläse				
Saugpumpe				
Rückspülpumpe	2,06	474	0,5	3,95
Befüllungspumpe				
Umwälzpumpe/Steuerung	1,15	242	0,5	2
gesamt (Spitzenlast)	<b>20,6</b>	<b>4716</b>		<b>39,29</b>

Tabelle 9: Energiebedarf in Phase 4 (Rückspülung mit Luftüberströmung) und maximale Stromflüsse

<b>Verbraucher</b>	<b>Strom [A]</b>	<b>Leistung [W]</b>	<b>Laufzeit [min]</b>	<b>Energieverbrauch je Zyklus [Wh]</b>
Ultraschallanwendung				
Gebläse	2,5	300	1,5	7,5
Saugpumpe				
Rückspülpumpe	2,06	474	1,5	11,85
Befüllungspumpe				
Umwälzpumpe/Steuerung	1,15	242	1,5	6,05
gesamt (Spitzenlast)	<b>5,71</b>	<b>1016</b>		<b>25,4</b>

Daraus ergibt sich, dass der Spitzenstromfluss in Phase 3, bedingt durch die Ultraschallanwendung, erreicht wird. Er beträgt 20,6 Ampère, wird aber nur über einen Zeitraum von maximal 30 sec benötigt. Das gilt ebenso für den höchsten Leistungseinsatz in dieser Phase von 4716 Watt. Der größte Energiebedarf entsteht in Phase 1 durch die Saugpumpe bei der Filtration. Er beträgt 377,6 Wh in den 30 min der Filtrationsphase.

Nun kann der Gesamtenergieverbrauch der Anlage pro Zyklus, pro Stunde und pro Tag angegeben werden.

Durch Addition der Energieverbrauchswerte der einzelnen Phasen ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch von 450,29 Wh pro Filtrationszyklus, also in 34 min. Daraus errechnet sich der Gesamtenergieverbrauch der Anlage zu 794,63 Wh bei der Laufzeit von einer Stunde.

Für 24 Stunden ergibt sich dabei ein Gesamtenergieverbrauch von rund 19 kWh.

Wird die Anlage ausschließlich mit Wasserüberstau betrieben, würde die Saugpumpenleistung in Phase 1 wegfallen, und damit 237 Wh bei jedem Filtrationszyklus eingespart. Damit wird pro Filtrationszyklus nur noch eine Energie von 213,29 Wh benötigt und damit insgesamt nur noch knapp die Hälfte. Der Stundenverbrauch liegt dann bei 376,39 Wh und der Tagesverbrauch bei rund 9 kWh. Das setzt voraus, dass der Rohwasserbehälter für den Zulauf der Anlage sich oberhalb des Filtrationstanks befindet, so dass das Wasser gravitativ zulaufen kann.

Wählt man z.B. eine Bleibatterie des Typs Varta PROMotive Black mit einer Kapazität von 200 Ampèrestunden (Ah) und einem Kälteprüfstrom von 1050 Ampère, so bedeutet dies, dass die Batterie eine Stromstärke von 200 Ampère bei 12 Volt eine Stunde lang abgeben kann.

Da die Batterie nicht tiefst entladen werden darf, geht man davon aus, dass zwei Drittel der Kapazität genutzt werden können. Das wären dann rund 133 Ah. Die nutzbare Energie liegt dann bei 1600 Wh, statt 2400 Wh (bei 100% Ausnutzung).

Der Kälteprüfstrom kennzeichnet die Stromabgabefähigkeit einer Batterie bei Kälte. Nach DIN EN 50342 muß die Klemmenspannung bei Entladung mit dem Kälteprüfstrom und -18°C, 10 sec nach Entladebeginn mindestens 7,5 V betragen (Robert Bosch GmbH, 2007). Der Kälteprüfstrom stellt also den Lastfall für eine Batterie unter widrigen Bedingungen dar.

Mit der Formel:

$$P = U \cdot I \quad \text{bzw.} \quad I = P/U$$

$P$  = Leistung in Watt [W]

$U$  = Spannung in Volt [V]

$I$  = Stromstärke in Ampère [A]

lassen sich die Stromstärken in Ampèrestunden der Batterie bei einer Spannung von 230 Volt ausrechnen:

$$I = 2400 \text{ W} / 230 \text{ V} = 10,43 \text{ Ampère.}$$



Für den Kälteprüfstrom gilt dann:

$$I = 12600 \text{ W} / 230 \text{ V} = 54,78 \text{ Ampère.}$$

Geht man von zwei Drittel nutzbarer Kapazität aus, liefert die Batterie bei 230 Volt 6,95 Ah und einen kurzzeitigen Entnahmestrom von maximal 36,52 Ampère. Die nutzbare Energie beträgt dann 1600 Wh (1,6 kWh).

Da der Energieverbrauch der Anlage pro Stunde bei maximal rund 800 Wh liegt, würde die Kapazität einer solchen Batterie ausreichen. Da aber bei der Entnahme für die Ultraschallanwendung über einen Zeitraum von 30 sec, 20,6 Ampère fließen müssen, empfiehlt es sich zur Sicherheit, zwei Batterien in Reihe zu schalten. Damit ist auch der Energiebedarf der Anlage für vier Stunden gedeckt.

Wenn für die Anlage vier der entsprechenden Batterien verwendet werden, würde die Stromversorgung rechnerisch für acht Stunden ohne Neuaufladung ausreichen.

Daher sollen hier vier Stück dieser Batterien eingesetzt werden, da unter anderem die Solarzellen nachts keine Ladung bringen.

Weiterhin wird ein Spannungswandler benötigt, der die 12-Volt Ausgangsspannung der Batterien in eine Spannung von 230 Volt transformiert. Da die Solarzellen, wie auch die Batterien, Gleichstrom liefern, die Geräte der Membranaufbereitungsanlage jedoch mit Wechselstrom betrieben werden, muss dieser auch die Funktion eines Wechselrichters erfüllen.

Hier kann beispielsweise ein Spannungswandler von 12 V auf 230 V mit 3000 Watt Dauerausgangsleistung und kurzzeitiger Spitzenausgangsleistung von 6000 Watt verwendet werden. Bei 230 Volt können damit dauerhaft 13 Ampère abgegeben werden. Zwar würde die kurzzeitige Spitzenausgangsleistung 26 Ampère liefern und damit für die Spitzenlast von 20,6 Ampère ausreichend sein, jedoch sollen zur Sicherheit auch hier zwei Spannungswandler verwendet werden. Der Hersteller gibt an, es sollten 20-30 % Reserve zu der benötigten Leistung des Spannungswandlers hinzugerechnet werden, da ein zu schwacher Wandler, eine Schädigung desselben, wie auch angeschlossener Geräte, bewirken könnte. Weiterhin verhindert der Wandler eine zu tiefe Entladung der Batterien durch rechtzeitige Abschaltung.

Die Laderegler werden für ein 24 Volt-System ausgelegt. Dafür werden 3 Laderegler des Models MPS 80 (modular power switch, 80 Ampère) der Phocos AG verwendet. Dabei wird ein MPS 80 als Solarcharger konfiguriert und es werden jeweils 2 Solarmodule in Reihe geschaltet. Für den Windgenerator werden 2 MPS 80 verwendet (für 125 Ampère), sie werden als Generatorcharger konfiguriert (es werden 2 x (0,3 Ohm, 1500 Watt) Dumploads (Heizwiderstände) zum Beseitigen von Ladeüberschüssen benötigt).

Der MPS ist einsetzbar bei Hybridsystemen, hat einen variablen Tiefentlade- bzw. Überladeschutz, ist automatisch oder manuell betreibbar und erlaubt die Nutzung von Überschußenergie (Quelle: Phocos AG).

Die zu verwendenden Solarzellen sollten einen hohen Wirkungsgrad haben, damit sie so kompakt wie möglich sind und der Flächenbedarf damit nicht zu hoch ist. Als Beispiel könnte das Solarmodul E19/318 von der Fa. Sunpower verwendet werden. Es ist ein sehr leistungsfähiges, monokristallines Solarmodul mit einem Wirkungsgrad von 19,5% und einer Leistung von 318 Watt peak (Wp). Daneben hat es eine Leistungsgarantie von 25 Jahren. Die Abmessungen des Moduls betragen 1,56 m x 1,05 m, das sind pro Modul rund 1,638 m<sup>2</sup>. Das Modul liefert eine Spannung von 54,7 Volt und einen Strom von 5,82 Ampère. Die Spitzenleistung in Watt peak wurde ermittelt bei einer Energieeinstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup> und einer Zelltemperatur von 25°C. Die Leistung in Watt peak des Solarmoduls wird im Prinzip nur unter Laborbedingungen erreicht, daher ist der tatsächliche Energiegewinn je nach Einstrahlung entsprechend niedriger.

Als Beispiel soll eine Anlage für die Region Darmstadt-Ost/Vorderer Odenwald berechnet werden.

Es soll eine Solar-Wind-Hybridanlage sein, wobei der Begriff „Hybrid“ für die Kombination von Energiegewinnungssystemen steht.

Um den Ertrag über Solarzellen abschätzen zu können, wird die Globalstrahlung auf der ausgewählten Fläche benötigt. Die Daten für den östlichen Darmstädter Raum wurden dem Umweltatlas Hessen entnommen. Die Werte entsprechen der mittleren Globalstrahlung für die Jahre 1981-2000. Als Jahressumme ergibt das etwa einen Wert von 1070 kWh/m<sup>2</sup>. Da die Versorgung im Sommer deutlich besser ist als im Winter, werden die Werte aufgeteilt nach Monaten betrachtet. Der Wirkungsgrad der Solarzellen (Solarmodul E 19/318 von Sunpower) beträgt 19,5%, damit liegt die Ausbeute aus der Globalstrahlung bei 19,5%. Bei der Verwendung von 14 der oben genannten Solarzellmodule ergibt sich eine Gesamtfläche von 22,93 m<sup>2</sup>. Bei 2 x 7 Modulen ergibt sich eine Flächenaufteilung von 3,12 m x 7,35 m. Das Gesamtgewicht beträgt 260 kg.

Die ermittelten Werte sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Globalstrahlung über die Monate und Energieausbeute über die Solarzellenanlage

Monat	Globalstrahlung [kWh/m <sup>2</sup> ]	19,5% der Globalstrahlung [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energieausbeute [kWh]
Januar	24,18	4,72	108,23
Februar	42,84	8,35	191,47
März	78,43	15,29	350,6
April	120,9	23,58	540,69
Mai	155,93	30,41	697,3
Juni	158,4	30,89	708,31
Juli	163,68	31,92	731,93
August	140,43	27,38	627,82
September	90,9	17,73	406,55
Oktober	55,18	10,76	246,73
November	23,4	4,56	104,56
Dezember	16,28	3,17	72,69
<b>Summe</b>	<b>1070,55</b>	<b>208,76</b>	<b>4786,88</b>

Als Summe ergibt sich über das Jahr ein Wert von 4787 kWh. Aufgeteilt nach Sommer und Winterhalbjahr wird der Unterschied deutlich.

Der maximale Energiebedarf der Anlage in der Stunde mit 800 Wh und 19,2 kWh pro Tag veranschlagt, bedeutet einen maximalen Energiebedarf für das Sommerhalbjahr, Gelb unterlegt, (April-September: 183 Tage) von 3513,6 kWh. Erhalten durch Solarenergie werden 3713 kWh, das wäre also ausreichend. Hingegen für das Winterhalbjahr (182 Tage) mit maximalem Energiebedarf von 3494 kWh kann mit 1074 kWh nur etwa ein knappes Drittel des Energiebedarfs über Solarenergie gedeckt werden.

Daher wird eine zusätzliche Energiegewinnungsquelle erforderlich. Hier bietet sich ein Windgenerator an.

Um abzuschätzen, wieviel Windenergie der Generator in etwa erzeugen kann, ist eine Aufteilung nach Windstärken erforderlich. Auch die Aufteilung nach Sommer- und Winterhalbjahr ist hier interessant, da der Generator eine Energieergänzung zur Solaranlage darstellt und daher im Winter der zusätzlich benötigte Energiebedarf höher ist.

Dazu wurden Daten der HLUg für die Wettermessstation Fürth im Odenwald verwendet. Diese Messstation liegt 484 m über NN auf einem Berg und ist von Wald umgeben. Die Messwerte werden in 3,5 m Höhe entnommen. Da der Wind nach der Höhe hin zunimmt (vertikales Windprofil, auch logarithmisches Windprofil genannt) lässt sich der Wert für eine Höhe von 10 m mit Hilfe der Formel:

$$v_1 = v_2 \cdot (\ln(h_1/z_0)/\ln(h_2/z_0))$$

mit

- $v_1$  = zu ermittelnde Windgeschwindigkeit für die Höhe von 10 m
- $v_2$  = Windgeschwindigkeit gemessen in der Höhe von 3,5 m
- $h_1$  = Höhe von 10 m (Wert auf den umgerechnet wird)
- $h_2$  = Höhe von 3,5 m (Höhe, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wurde)
- $z_0$  = Rauigkeitsklasse (auch Rauigkeitslänge) nach den Rauigkeitsklassen für Oberflächen nach dem Europäischen Windatlas (hier: für die Oberfläche Wald beträgt der Wert 0,4)

berechnen.

Diese Formel gilt aber nur innerhalb der bodennahen Schicht, die auch als Prandtl-schicht bezeichnet wird. Sie kann variieren und wird je nach Witterung mit Mächtigkeiten zwischen 20 und 100 m angegeben.

Der Windgenerator wird zur besseren Energieausbeute in einer Höhe von 10 m aufgestellt.

Für dieses Berechnungsbeispiel dient das Modell des Windgenerators Inclin 3000 mit einer Nennleistung von 3000 Watt. Dieser hat den Vorteil, dass er bereits bei niedrigen Windgeschwindigkeiten beginnend bei 2 m/s Strom produziert. Das ist besonders in den gemäßigten Breiten im Binnenland von Vorteil, da hier zahlenmäßig die niedrigeren Windgeschwindigkeiten vorherrschen. Der Windgenerator wiegt 125 kg. Abbildung 55 zeigt ein Bild des Windgenerators und seine Leistungskurve, auf der die Rechnungen basieren.

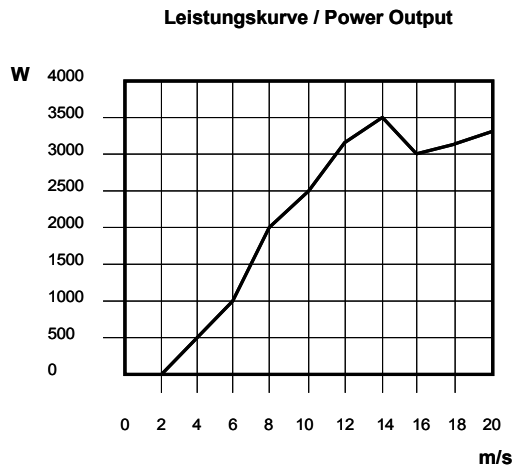


Abbildung 55: links: Foto des Inclin 3000 ([www.heyde-windtechnik.de/inclin.htm](http://www.heyde-windtechnik.de/inclin.htm)),  
rechts: Leistungskurve der Windkraftanlage (nach: [www.kleinwindanlagen.de/html/inclin\\_3000](http://www.kleinwindanlagen.de/html/inclin_3000))

Die Windgeschwindigkeitsklassen in m/s für die Messstation Fürth sind aufgeteilt in Werte bis 1,5 m/s, bis 3 m/s, bis 4,5 m/s, bis 6 m/s, bis 7,5 m/s und über 7,5 m/s.

Um mit den Werten übersichtlich rechnen zu können, wurde modellhaft von einer gleichmäßigen Verteilung innerhalb der Windklasse ausgegangen und mit den Mittelwerten gerechnet.

In der Klasse bis 1,5 m/s wird keine Windenergie produziert, die danach angesetzten Werte sind: 3,34 m/s, 5,57 m/s, 7,79 m/s, 10,02 m/s und über 10,02 m/s.

Die aus den jeweiligen Windstärken gewonnene Energie, getrennt betrachtet nach Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr, kann den Tabellen 11 und 12 entnommen werden.

Tabelle 11: Mit Hilfe des Windgenerators Inclin 3000 gewonnene Windenergie (berechnet) über die Windklassen für das Winterhalbjahr der Messstelle Fürth im Odenwald.

Windstärke [m/s]	Leistung [W]	Tage	Gesamtenergiewert pro Windklasse [kWh]
3,34	337,5	70,36	569,92
5,57	892,5	43,66	935,2
7,79	1900	16,85	768,36
10,02	2500	4,33	259,8
> 10,02	2750	0,56	36,96
<b>Summe</b>			<b>2570,24</b>

Mit rund 2570 kWh Energieausbeute für das Winterhalbjahr sind knapp  $\frac{3}{4}$  des maximalen Bedarfes (3494 kWh) durch Windenergie gedeckt.

Tabelle 12: Mit Hilfe des Windgenerators Inclin 3000 gewonnene Windenergie (berechnet) über die Windklassen für das Sommerhalbjahr der Messstelle Fürth im Odenwald.

Windstärke [m/s]	Leistung [W]	Tage	Gesamtenergiewert pro Windklasse [kWh]
3,34	337,5	79,79	646,3
5,57	892,5	19,6	419,83
7,79	1900	4,57	208,39
10,02	2500	0,4	24
> 10,02	2750	0,01	0,66
<b>Summe</b>			<b>1299,18</b>

Mit rund 1299 kWh Energieausbeute für das Sommerhalbjahr sind gut  $\frac{1}{3}$  des maximalen Energiebedarfes (3513,6 kWh) durch Windenergie gedeckt.

Betrachtet man nun die Werte der Solaranlage und die Werte der Windkraftanlage zusammen, so ist festzustellen, dass sie sich auf das vortrefflichste ergänzen. Während die Solaranlage im Sommer den Hauptanteil der Energiegewinnung übernimmt, gilt dies für die Windkraftanlage im Winter. Damit ist der maximale Energiebedarf für die Anlage im Winter, wie auch im Sommer gedeckt (Tabelle 13), wenn auch im Sommer ein höherer Überschuss besteht. Da es sich um die Werte des maximalen Energiebedarfes bei Dauerbetrieb handelt, sollte die Anlage ausreichend versorgt sein.

Tabelle 13: Gesamtversorgung aus Solar- und Windenergie der Modellanlage im Sommer und im Winter

Jahreszeit	Solarenergie [kWh]	Windenergie [kWh]	Summe [kWh]
Sommer	3713	1299	5012
Winter	1074	2570	3644
gesamt	4787	3869	8656

Zusammenfassend erhält man im Sommerhalbjahr mit entsprechender Anlage 5012 kWh gegenüber dem Bedarf von 3513,6 kWh, im Winterhalbjahr 3644 kWh gegenüber dem Bedarf von 3494 kWh. Theoretisch würden im Sommer die Solarzellen

ausreichen, jedoch bringen sie nachts keinen Strom und es gibt bekanntermaßen auch trübe Tage. Deshalb ist es empfehlenswert auch im Sommerhalbjahr die Windanlage zu betreiben. Die überschüssige Energie kann dabei an andere Nutzer abgegeben werden.

### **5.3 Ergebnisbetrachtung**

Somit erhält man eine energieautarke und klimaneutral arbeitende Membrananlage zur chemikalienfreien Trinkwasseraufbereitung mit Hilfe von Ultraschall.

Diese Anlage ist mobil und kann auch fernab von Infrastruktur betrieben werden. Nur eine Rohwasserquelle muss natürlich vorhanden sein.

Je nach Standort ist auch die Nutzung anderer Energieformen denkbar, wie z.B. Wasserkraft. In südlichen Regionen (Äquatornähe) ist der alleinige Betrieb über Solarzellen denkbar, in Küstenregionen die alleinige Nutzung über Windenergie, wobei auch hier Solarstrom erfolgreich gewonnen werden kann, wie das Beispiel Schleswig-Holstein belegt. Sie produzieren mit 12 700 Anlagen eine Nennleistung von 300 Megawatt (Süddeutsche Zeitung, 8.11.2010).

Wird eine noch höhere Versorgungssicherheit gewünscht, kann auch die Batteriekapazität erhöht werden. Eine weitere sehr interessante Technologie ist die Nutzung gewonnener überschüssiger Energie, indem Wasserstoff durch Aufspaltung aus Wasser gewonnen wird und in Zeiten knapper Energieversorgung zur Energiegewinnung verbrannt werden kann. Daraus entsteht als Verbrennungsprodukt lediglich Wasser.

Da es sich bei dem Modell der Solar-Wind betriebenen Membrananlage zur Trinkwasseraufbereitung nur um ein Rechenmodell handelt, ist dieses noch zu erproben. Dabei ist es interessant, ob die Anlage wie erwartet funktioniert und wie lange die tatsächliche Lebensdauer der Komponenten ist.

Während die Solarzellen 25 Jahre lang Leistung bringen, kann bei der Windkraftanlage von 15 Jahren ausgegangen werden (Heyde Windtechnik, 2010). Verschleißteile sind zum Teil zu ersetzen, wie auch bei den Pumpen. Gerade die Netzsch Mohnopumpen (Reversierpumpe) haben aber sehr lange Lebensdauern von 20 Jahren und mehr. Auch beim Ultraschallmodul kann bei dieser Anwendung von einer sehr hohen Lebensdauer ausgegangen werden (theoretisch von 25 Jahren und mehr), da die Einschaltphasen des Ultraschalls sehr kurz sind und die Abnutzung der piezoelektrischen Schwinger proportional zu ihrer Laufzeit ist. Die Standzeit des Membranmoduls muss in realer Anwendung festgestellt werden. Bei notwendigem Ersatz der Membranen sind aber bei dem hier verwendeten Biocel-Modul (Fa. Microdyn-Nadir)

auch separate Membranpakete erhältlich, so dass nicht das ganze Modul ausgetauscht werden muss.

Prinzipiell kann die Anlage in verschiedensten Größenordnungen gefertigt werden.

Soll die Anlage unter Umständen einmal abgeschaltet werden, was durch Relaxation zu sehr viel besseren Permeabilitätswerten bei der Membran führt, wie sich beim Betrieb der Versuchsanlage gezeigt hat, sollte der Permeattank groß genug gewählt werden. Es kann aber auch zusätzlich ein externer Wasserspeicher angelegt werden. Bei einer längeren Aufbewahrung muss das Wasser vor Wiederverkeimung geschützt werden. Hier empfiehlt sich eine leichte Chlorung.

Bei den Solarzellen geht die Entwicklung rasch voran. So werden stetig höhere Wirkungsgrade erreicht, so dass diese Technik als sehr zukunftsfähig angesehen werden kann. Viele neue Materialien und Materialkombinationen werden erforscht. Die sogenannte Tandemsolarzelle, bestehend aus mehreren Materialien, kann das theoretische Effizienzlimes auf annähernd 90% erhöhen. Tandemsolarzellen aus der Kombination dreier Materialien erreichten im Labormaßstab bereits einen Wirkungsgrad von etwa 45% (Norpoth, 2010).

So gewinnt diese Technik stetig an Effizienz und hat den unschlagbaren Vorteil, dass diese Energieform ständig zur Verfügung steht, d.h. erneuerbar ist.



## **6. Zusammenfassung und Ausblick**

### **6.1 Zusammenfassende Betrachtung**

Von früheren Forschungen ist bekannt, dass Ultraschall zur Flusserhöhung bei Membranfiltrationsverfahren sehr wirkungsvoll ist. Jedoch war immer wieder das Problem der Membranzerstörung gegeben. Es galt, ein Konzept zu finden, welches die reinigenden und flusserhöhenden Vorteile mit Zerstörungsfreiheit und ohne Qualitätsminierungen des erhaltenen Produktes verbindet.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen ein solches Konzept zu finden. Der Prototyp einer solchen Anlage lieferte in zahlreichen Versuchsreihen entsprechende Ergebnisse. Zur Darlegung des tatsächlich durch den Ultraschall beeinflussten Effektes wurden in der Versuchsanlage zwei baugleiche Verfahrenslinien, die sich nur durch die Adaption des Ultraschalls bei einer der Linien unterschieden, aufgebaut.

Im Gegensatz zu anderen Konzepten sind hier bestimmte, aber entscheidende Rahmenbedingungen anders gewählt worden. Es handelt sich bei diesem Membranverfahren um getauchte Membranen in einem offenen Filtrationstank, also einem offenen System gegenüber den bisher untersuchten, geschlossenen Druckrohrsystemen. Bei letzteren erwies sich die Adaption von Ultraschallgebern als schwierig und aufwändig. Der Vorteil beim hier verwendeten offenen System ist, dass handelsübliche Tauchschwinger nur in den Filtrationstank eingehängt werden müssen. Weiterhin handelt es sich bei den verwendeten Membranen um Flachmembranen, die out/in betrieben werden, d.h. der zurückgehaltene Schmutz lagert sich außen ab und ist damit zugänglich. Das Membranmodul weist zusätzlich die Möglichkeit der Rückspülbarkeit auf. Es ist damit das erste seiner Art und macht dadurch den hier zum Erfolg führenden Verfahrensablauf erst möglich.

Durch das in dieser Arbeit durch Versuche an der Pilotanlage entwickelte Ultraschall-Luft-Rückspülverfahren (kurz: USL-Verfahren) war es möglich, eine deutliche und dauerhafte Permeabilitätssteigerung, bei unverändert guter Permeatqualität, zu erhalten. Bei deckschichtkontrollierter Filtration war sogar eine Permeatverbesserung mit Hilfe des ultraschallunterstützten Verfahrens zu beobachten. Um die MembranınTEGRITÄT sowie die Qualität des erhaltenen Permeates zu überwachen, wurden online Trübungsmessung und Partikelzählung durchgeführt, sowie auch eine Analyse durch ein akkreditiertes Labor.

Es zeigte sich, dass nur in der Abfolge: Filtration, Pause, Permeatrückspülung mit gleichzeitigem Ultraschalleinsatz, Permeatrückspülung mit Luftblasenüberströmung, Pause, erneute Filtration, der gewünschte Erfolg zu erzielen war. Die Scherwirkung der Luftblasen führt zur Ablösung von Deckschichtbruchstücken, die vorher durch den Ultraschall sorgsam gelockert wurden. Der Einsatz von Ultraschall zeigte bei Membranen, die bereits in Betrieb waren, einen deutlichen Effekt: die Membran mit

Ultraschall lief bei Aufkonzentration im Filtrationstank 16 Tage konstant, die Membran ohne Ultraschall nur etwa einen Tag. Im Vergleich der Membranen bei gleichbleibender Konzentration im Filtrationstank zeigte die Membran mit Ultraschall eine um 100% höhere Leistung. Wird der Ultraschall bei neuen Membranen gleich zu Beginn eingesetzt, ergeben sich noch vielfach höhere Leistungsunterschiede.

Während der Einsatz des Ultraschalls zunächst eine Minute betrug, konnte dieser auf 15 sec bei gleicher Wirkung verringert werden. Dadurch wird das Verfahren auch energetisch sparsam, entgegen vielfältiger Befürchtungen, Ultraschallverfahren könnten zu energieaufwändig sein. Ist das zu reinigende Wasser bereits von guter Qualität, kann durch Reduktion der Ultraschall-Leistung und einen höheren spezifischen Membranfluss weitere Energie eingespart werden. Allerdings muss die Ultraschall-Leistung ausreichend hoch sein, um die Kavitationsschwelle zu überschreiten und damit Kavitation zu erzeugen, da sonst kein Reinigungseffekt möglich ist.

Das Verfahren erwies sich als stabil, auch beim Einsatz von unvorgereinigtem Rohwasser einer Trübung von 100 FNU.

Für den Erfolg des Verfahrens entscheidend ist ebenfalls, dass die Frequenz des Ultraschalls mit entsprechender Wellenlänge und der Membrantaschenabstand zueinander passen. Im günstigsten Fall beträgt der Membrantaschenabstand eine halbe Schall-Wellenlänge. So ist gewährleistet, dass sich ein Schallfeld zwischen den Membrantaschen ausbilden kann. Ist die Wellenlänge zu groß, z.B. bei niedriger Frequenz, und der Membrantaschenabstand zu klein, kann sich kein Schallfeld zwischen den Membranen ausbilden und es tritt kein Reinigungseffekt ein. Bei den Versuchen war dies bei 35 kHz der Fall. Bei 130 kHz dagegen stimmten die Verhältnisse von Wellenlänge und Membrantaschenabstand überein.

Der Reinigungsmechanismus, aufgrund der Ergebnisse der Versuchsanlage auf mikroskopischer Ebene an der Universität Göttingen untersucht, brachte Aufschluss über die Reinigungsmechanismen. Der Reinigungseffekt beruht dabei nicht auf dem Effekt von Mikrojets, wie zunächst vermutet, sondern dem reinigenden Effekt von oszillierenden Blasen und ihren Mikroströmungen, die gleichsam die zu reinigenden Oberflächen „abknabbern“. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass die Membran schallweich reagiert, was bedeutet, dass sich die Membranen im Stehwellenfeld im Bereich der Schallknoten befinden. Der Bereich der Schallbäuche befindet sich zwischen den Membrantaschen. Da sich gemäß der primären Bjerkneskraft im Stehwellenfeld kleine Blasen im Bereich der Schallbäuche ansiedeln, bilden sich zwischen den Membrantaschen Blasenwolken aus. Durch Vereinigung und Aufschwingen einzelner Blasen, werden diese so groß, dass sie den Minnaert-Radius überschreiten, was für sie bedeutet, dass sie gemäß der primären Bjerkneskraft zu den Schallknoten wandern und somit auf die Membranoberfläche. Hier oszillieren sie mit teilweise sehr schnellen Bewegungen und lösen die Verschmutzungen auf den Ober-

flächen. Nachschub erhalten sie immer wieder durch Blasen aus dem Membranzwischenraum.

Da es sich hier bei den oszillierenden Blasen und Mikroströmungen um sogenannte weiche Kavitation handelt, werden die Membranen sehr schonend abgereinigt und nicht beschädigt. Mikrojets konnten in diesem Bereich nicht beobachtet werden. Da sich Mikrojets immer in Richtung einer schallharten Wand ausbilden, die Membran hier aber schallweich reagiert, wäre ihre Richtung von der Membran abgewandt.

Die Modellrechnung einer Solar-Wind betriebenen, autarken Anlage für gemäßigte Breiten zeigt, dass es möglich ist, ein solches System selbständig mit regenerativer Energie zu betreiben. Wie standfest eine solche Anlage ist, müsste sich jedoch erst durch den Betrieb eines Prototypen erweisen.

Damit ist eine membrane Trinkwasseraufbereitungsanlage geschaffen, die klimaneutral und mit Hilfe von Ultraschall chemikalienfrei arbeitet, sowie mobil ist.

Gebiete, die keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben, liegen fast ausschließlich in Bereichen fernab von Infrastruktur. Gerade hier könnte eine solche Anlage einen wertvollen Beitrag zur Versorgung leisten und damit mehr Menschen dauerhaft den Zugang zu sauberem Trinkwasser ermöglichen.

## **6.2    Ausblick und weiterer Forschungsbedarf**

Die Ergebnisse der Versuchsanlage haben gezeigt, dass ein chemikalienfreies Reinigungsverfahren von Membranen zur Trinkwasseraufbereitung mit Hilfe von Ultraschall durchführbar und vielversprechend ist.

Gleichzeitig ist die Forschung auf diesem Gebiet erst am Anfang. Die Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass noch großes Entwicklungspotenzial in diesem Bereich besteht.

In einem nächsten Schritt sollte das Verfahren in genutzte Membrananlagen integriert werden und seine Praktikabilität und Standfestigkeit im Langzeittest beweisen. Weiter sollten verschiedene Größenordnungen getestet werden.

Die Eignung verschiedener Membranmaterialien ist zu untersuchen, wie auch der Effekt bei ganz unterschiedlichen zu filtrierenden Stoffen, insbesondere in industriellen Trennverfahren. Gerade hier kann es möglich sein, dass schwer zu filtrierende Stoffe erst mit Hilfe der Permeabilitätsverbesserung durch den Ultraschall wirtschaftlich filterbar werden und so neue Verfahren ermöglichen.

Gelänge es, auch für die Umkehrosmose ein solches Verfahren zu etablieren, wäre das von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Dazu müssten Kavitationsformen auch unter höheren statischen Drücken untersucht werden.

Auch verschiedene Verfahrenskombinationen sollten betrachtet werden, da sie unter Umständen durch Synergieeffekte eine vielfach verbesserte Wirkung bringen können. Bei den Membranverfahren ist dabei unter anderem an mehrstufige Membransysteme zu denken, die bei stärker verschmutzten Flüssigkeiten wesentlich effektiver arbeiten können als einstufige Membransysteme, bei denen die gesamte Schmutzfracht durch ein Membranmodul filtriert werden muss und dessen Belastung dementsprechend groß ist.

Im Hinblick auf autarke, nachhaltige Trinkwassergewinnungsanlagen wird erkennbar, dass gerade im Bereich regenerativer Energien deutliche Effizienzsteigerungen zu erwarten sind, wenn man z.B. an die Solartechnologie denkt. Während die Wirkungsgrade zur Zeit erhältlicher Solarzellen im Bereich von 20% liegen, gibt es bereits Materialkombinationen, die im Labormaßstab Wirkungsgrade von 45% erreichen. Weitere Steigerungen sind zu erwarten. Auch neue Materialien für Solarzellen werden erprobt, die beispielsweise mit chemischen Elementen arbeiten, die als Ressource in mengenmäßig großer Zahl vorhanden sind.

Ziel sollte es im Sinne der Nachhaltigkeit sein, die Verfahren so umweltfreundlich wie möglich zu gestalten. Neue Technologien, wie die hier vorgestellte, können dazu einen Beitrag leisten. Sie sind sehr vielversprechend und sollten daher auch genutzt werden. Je mehr sich die Technologien etablieren können, desto preiswerter werden sie anschließend. Die chemikalienfreie Trinkwasseraufbereitung, betrieben über regenerative Energien, könnte dabei ein großer Exporterfolg werden.

## Literaturverzeichnis

**Apfel, R. E.** (1984): Acoustic cavitation inception. Ultrasonics July 1984. 167-173.

**Ashokkumar, M., Vu, T., Grieser, F., Weerawardena, A., Anderson, N., Pilkington, N., Dixon, D.R.** (2003): Ultrasonic treatment of *Cryptosporidium* oocysts. Water Science and Technology, Vol 47 No 3 pp 173-177. IWA Publishing 2003.

**Briggs, L. J.** (1950): Limiting Negative Pressure of Water. Journal of Applied Physics 21. 721-722.

**Chen, D., Weavers, L. K., Walker, H. W.** (2006): Ultrasonic control of ceramic membrane fouling by particles: Effect of ultrasonic factors. Ultrasonics Sonochemistry 13 (2006) 379-387.

**Dezhkunov, N., Iernetti, G., Francescutto, A., Reali, M., Ciuti, P.** (1997): Cavitation Erosion and Sonoluminescence at High Hydrostatic Pressures. Acustica Vol. 83 (1997) 19-24.

**Doan, T., Jung, Ch.** (2006): Test-Resultate zur Ultraschall-Beständigkeit und Ultraschall-Reinigung von Kunststoff (PES/PET)-Membranen zur Trinkwasseraufbereitung. Versuchsbericht der Fa. Elma, Mai 2006.

**Eisele, G.** (2003): Untersuchung der weitergehenden Abwasserreinigung im Verbandsgebiet des AZV Bondorf-Hailfingen. In: Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik 30. September - 1. Oktober 2003, Beitrag A20, Aachen.

**Eisenmenger, W.** (2001): The mechanisms of stone fragmentation in ESWL. Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 27, No. 5, 683-693.

**Esche, R.** (1952): Untersuchung der Schwingungskavitation in Flüssigkeiten. Acustica, Akustische Beihefte 2 (1952) AB 208-AB 218.

**F.A. Brockhaus AG Mannheim** (2006): Schlüsselbegriff erneuerbare Energien. Bd. 8. S. 318-330

**Felver, B., King, D.C., Lea, S.C., Price, G.J., Walmsey, A.D.** (2009): Cavitation occurrence around ultrasonic dental scalers. Ultrasonics Sonochemistry 16 (2009) 692-697.

**Fisher, J. C.** (1948): The fracture of liquids. Journal of Applied Physics. Volume 19., 1063.

**Flemming, H. C.** (1995): Biofouling bei Membranprozessen. Springer Verlag, Berlin 1995.

**Flemming, H. C., Spettmann, D., Wingender, J., Boley, A., Müller, W. R., Went, J.** (2007): In-situ Ultraschallabreinigung für Kleinmembransysteme in der Trinkwasser-

aufbereitung. Gemeinsamer Abschlussbericht des Verbundprojekts, gefördert durch das BMWi, Veröffentlichungsdatum 30.6.2007. Duisburg, Stuttgart, Freiburg.

**Gallego-Juarez, J.A., Riera, E., Acosta, V., Rodríguez, G., Blanco, A.** (2010): Ultrasonic system for continuous washing of textiles in liquid layers. *Ultrasonics Sonochemistry* 17 (2010) 234-238.

**Gimbel, R., Hagmeyer, G.** (2003): Anforderungen an die Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung. In: Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik 30. September - 1. Oktober 2003, Beitrag Ü3, Aachen.

**Gimbel, R., Panglisch, S., Loi-Brügger, A.** (2007): Stand der Technik und Wissenschaft beim Einsatz der Membrantechnik bei der Trinkwassergewinnung – State of the art of membrane technology to produce drinking water. In: Begleitbuch zur 7. Aachener Tagung Wasser und Membranen 30.-31. Oktober 2007, Beitrag Ü1, Aachen.

**Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie** (2010): Daten über die Windverteilung der Luftmessstation Fürth/Odenwald. Auf Anfrage zusammengestellt und übermittelt von S. Jacobi.

**Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie** (2010): Luftmessstation Fürth/Odenwald.

<http://www.hlug.de/fileadmin/sripts/recherche/info/FürthOdenwald.pdf>

**Heyde Windtechnik** (2010): persönliche Mitteilung

**Holy, A., Urban, F., Dautzenberg, W., Sous, P., Oligschläger, J., Hagmeyer, G.** (2003): Planung einer UF-Anlage mit einer Leistung von 6000 m<sup>3</sup>/h zur Trinkwasseraufbereitung im WW Roetgen. In: Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik 30. September - 1. Oktober 2003, Beitrag W23, Aachen.

<http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/>

(2010): Umweltatlas Hessen

<http://www.heyde-windtechnik.de/inclin.htm> (2010): INCLIN-Windkraftanlagen

[http://www.kleinwindanlagen.de/html/inclin\\_3000.de](http://www.kleinwindanlagen.de/html/inclin_3000.de)

(2009): Inclin 3000

<http://www.sunpower.de> (2010): E19/318 Solarmodul

<http://www.varta-automotive.de> (2010): Varta PROmotive Black

<http://www.yatego.com> (2010): Spannungswandler 12V-230V 3000/6000 W

**Jung, Ch., Sobotta, R.** (2009): About the Threshold of the Transient Ultrasonic Cavitation in the Cavitation Noise at Different Frequencies. In: Fortschritte der Akustik – NAG/DAGA 2009 Rotterdam, DEGA Berlin 2009. 1348-1349.

**Kim, W., Kim, T.-H., Choi, J., Kim, H.-Y.** (2009): Mechanism of particle removal by megasonic waves. Applied Physics Letters 94, 081908

**Kobayashi, Ta., Kobayashi, Ts., Hosaka, Y., Fujii, N.** (2003): Ultrasound-enhanced membrane-cleaning processes applied water treatments: influence of sonic frequency on filtration treatments. Ultrasonics 41 (2003) 185-190.

**Kuppinger, F.-F., Hörpel, G., Hying, C.** (2001): Keramische Membranfolien vereinigen die Vorteile von polymeren und keramischen Membranen. In: Begleitband zum 8. Aachener Membrankolloquium 2001, Aachen.

**Kuttruff, H.** (2004): Akustik – eine Einführung. S. Hirzel Verlag, Stuttgart.

**Kuttruff, H.** (1988): Physik und Technik des Ultraschalls. S. Hirzel Verlag, Stuttgart.

**Kyllönen, H., Pirkonen, P., Nyström, M., Nuortila-Jokinen, J., Grönroos, A.** (2006): Experimental aspects of ultrasonically enhanced cross-flow membrane filtration of industrial wastewater. Ultrasonics Sonochemistry 13 (2006) 295-302.

**Kyllönen, H.M., Pirkonen, P., Nyström, M.** (2005): Membrane filtration enhanced by ultrasound: a review. Desalination 181 (2005) 319-335.

**Lamminen, M. O., Walker, H. W., Weavers, L. K.** (2006): Cleaning of particle-fouled membranes during cross-flow filtration using an embedded ultrasonic transducer system. Journal of Membrane Science 283 (2006) 225-232.

**Lamminen, M. O., Walker, H. W., Weavers, L. K.** (2004): Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes. Journal of Membrane Science 237 (2004) 213-223.

**Langbein, M.** : Erfahrungen zur chemischen Regeneration von siClaro Flachmembranen, <http://www.vsa.ch/uploads/media/m.Langbein.pdf>.

**Latt, K. K., Kobayashi, Ta.** (2006): Ultrasound-membrane hybrid processes for enhancement of filtration properties. Ultrasonics Sonochemistry 13 (2006) 321-328.

**Lauterborn, S.** (2008): Neues getauchtes Membranmodul mit Flachmembran für die Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächenwasser. Studienarbeit. Institut WAR, TU Darmstadt.

**Lauterborn, S., Urban, W.** (2008): Ultrasonic cleaning of submerged membranes for drinking water applications. Proceedings Acoustics '08 Paris, Société Française d'Acoustique (ed.) 90 (2008) 2603-2608.

**Lauterborn, S., Urban, W.** (2008): Energieoptimierte, ultraschallunterstützte Membranreinigung bei der Ultrafiltration von Oberflächenwasser. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2008 Dresden, DEGA Berlin 2008. 457-458.

**Lauterborn, S., Urban, W.** (2007): Ultraschallbehandlung getauchter Membranen zur Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächenwasser. In: 7. Aachener Tagung Wasser und Membranen. Aachen 2007, Beitrag W16.

**Lauterborn, S., Urban, W., Wagner, M.** (2007): Ultraschallreinigung von getauchten Membranen zur Aufbereitung von Trinkwasser aus Oberflächenwasser. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2007 Stuttgart, DEGA Berlin 2007. 123-124.

**Lauterborn, W.** (1969): Zu einer Theorie der Kavitationsschwellen. *Acustica* Vol. 22 (1969/70) 48-54.

**Lauterborn, W., Kurz, T.** (2010): Physics of bubble oscillations. Reports on Progress in Physics 73 (2010) 106501 (88pp). IOP Publishing.

**Lauterborn, W., Kurz, T., Mettin, R., Ohi, C.D.** (1999): Experimental and theoretical bubble dynamics, *Advances in Chemical Physics* 110 (1999) 295-380.

**Lauterborn, W., Mettin, R.** (2004): Schlussbericht des Teilprojektes „Beschreibung von akustischen Kavitationsfeldern“ im Rahmen des Verbundprojektes „Untersuchung von Kavitationsfeldern“, gefördert durch das BMBF, Göttingen 2004.

**Leighton, T.G.** (1994): *The Acoustic Bubble*. Academic. London.

**Lipp, P.** (2007): Bestandsaufnahme zum Betrieb von MF/UF-Anlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland. In: Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, Band 33, Karlsruhe.

**Luther, S.** (2000): Theoretische Beschreibung und experimentelle Untersuchung raum-zeitlicher Strukturbildung in akustischen Kavitationsblasenfeldern. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen.

Online unter: <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2001/luther/index.html>

**Mason, T.J.** (1999): Industrial applications of Sonochemistry and power ultrasonics. In: L.A. Crum et al. (eds.), *Sonochemistry and Sonoluminescence*, 377-390. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

**Masselin, I., Chasseray, X., Durand-Bourlier, L., Lainé, J.-M., Syzaret, P.-Y., Lemordant, D.** (2001): Effect of sonication on polymeric membranes. *Journal of Membrane Science* 181 (2001) 213-220.

**Meier-Haack, J., Carroll, C.** (2001): Modifizierung von PP-Hohlfaser-MF-Membranen mit hydrophilen Polymeren zur Minderung des Foulings während der Trinkwasseraufbereitung. In: Begleitband zum 8. Aachener Membrankolloquium 2001, Aachen.



**Melin, T., Löwenberg, J., Wintgens, T.** (2005): Perspektiven für den Einsatz der Membrantechnik in der Aufbereitung und Erschließung von Wasserressourcen. In: Begleitbuch zur 6. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik 26.-27. Oktober 2005, Beitrag Ü5, Aachen.

**Melin, T., Rautenbach, R.** (2004): Membranverfahren – Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. 2. vollständig bearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2004.

**Miller, M.W., Miller, D.L., Brayman, A.A.** (1996): A review of *in vitro* bioeffects of inertial ultrasonic cavitation from a mechanistic perspective. *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 22. No. 9, 1131-1154.

**Mørch, K. A.** (2007): Reflections on cavitation nuclei in water. *Physics of Fluids* 19, 072104.

**Muthukumar, S., Kentish, S.E., Stevens, G.W., Ashokkumar, M.** (2006): Application of ultrasound in membrane separation processes: A review. *Reviews in Chemical Engineering* 22 (2006) 155-194.

**Muthukumar, S., Yang, K., Seuren, A., Kentish, S.E., Ashokkumar, M., Stevens, G.W., Grieser, F.** (2004): The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry. *Separation and Purification Technology* 39 (2004) 99-107.

**Norpoth, J.** (2010): Wieviel Strom produziert eine Solarzelle? In: Extra-Tip vom 17. Oktober 2010, Hrsg.: Extra-Tip Werbungs- und Vertriebsgesellschaft mbH, 37073 Göttingen. [www.extratip-goettingen.de](http://www.extratip-goettingen.de)

**Olaf, J.** (1957): Oberflächenreinigung mit Ultraschall. *Acustica* Vol. 7, No. 5. 253-263.

**Panglisch, S.** (2001): Zur Bildung und Vermeidung schwer entfernbare Partikelablagerungen in Kapillarmembranen bei der Dead-End-Filtration. Dissertationen aus dem IWW Bd. 34. Eigenverlag, Mülheim an der Ruhr.

**Phocos AG** (2010): laut persönlicher Mitteilung.

**Pishchalnikov, Y.A., Sapozhnikov, O.A., Bailey, M.R., Williams, J.C., Cleveland, R.O., Colonius, T., Crum, L.A., Evan, A.P., McAteer, J.A.**, (2003): Cavitation Bubble Cluster Activity in the Breakage of Kidney Stones by Lithotripter Shockwaves. *Journal of Endourology*. Vol. 17, No. 7. 435-446.

**Reuter, F.** (2009): Ultraschallfelder und ihre Wirkungen in einer Membranreinigungsanwendung, Diplomarbeit, Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen.

**Reuter, F., Mettin, R., Lauterborn, W.** (2008): Pressure fields and their effects in membrane cleaning applications. *Proceedings Acoustics '08 Paris, Société Française d'Acoustique* (ed.) 90 (2008) 579-584.

**Richards, W.T., Loomis, A.L.** (1927): The chemical effects of high frequency sound waves. A preliminary survey. Journal of the American Chemical Society 49 (1927) 3086-3100.

**Robert Bosch GmbH Hrsg.** (2007): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 26. Auflage. Friedrich Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH. Wiesbaden.

**Seidel, T.** (2002): Vergleichende Untersuchungen zur Wasseraufbereitung mit getauchten Membranen. Dresdner Beiträge zur Lehre der Betrieblichen Umweltökonomie. Nr. 10/2002. Diplomarbeit. Hrsg. Professur für Betriebswirtschaftslehre, Betriebliche Umweltökonomie. Dresden.

**Siblik Elektrik ges.m.b.H & Co KG** (2000): PV-Anlagen, Planung und Service für Inselanlagen. Wien/Graz/Schwanenstadt/Zirl.

**Siegrist, H., Joss, A.** (2004): Verfahrenstechnik der Abwasserreinigung, Physikalische und chemische Verfahren, Mikro- und Ultrafiltration, Skriptum des Institutes für Hydromechanik und Wasserwirtschaft (EAWAG) der ETH Zürich.

**Sievers, M., Schläfer, O., Onyeché, T. I., Schröder, C., Bormann, H., Schäfer, S.** (2001): Reduzierung von Fouling/Scaling durch Ultraschalleintrag in Membranmodule. Kolloquium Produktionsintegrierte Wasser-/Abwassertechnik in Bremen, 2001.

**Süddeutsche Zeitung** (2010): Sonnenreicher Norden. Die Deutsche Küste ist ein guter Standort für Photovoltaik. Ausgabe 8. November 2010.

**Suslick, K.S. (ed)** (1988): Ultrasound: Its Chemical, Physical and Biological Effects. VCH Publishers, New York.

**VDI (Hrsg.)** (2000): Technologieanalyse: Von der Kavitation zur Sonotechnologie, VDI/BMBF, Düsseldorf 2000.

**Vereecke, G., Holsteys, F., Arnauts, S., Beckx, S., Jaenen, P., Kenis, K., Lis-mont, M., Lux, M., Vos, R., Snow, J., Mertens, P.W.** (2005): Evaluation of Megasonic Cleaning for sub-90-nm Technologies. Solid State Phenomena, Vols. 103-104, 141-146. Trans Tech Publications, Switzerland.

**Winkelmeier, H.** (2005): Energiesysteme-Windenergie, 03 Windmessung, WS 2005/06. [www.energiwerkstatt.org](http://www.energiwerkstatt.org).

**Zheng, Q., Durben, D. J., Wolf, G. H., Angell, C. A.** (1991): Liquids at large negative pressures: Water at the homogeneous nucleation limit. Science, Volume 254, 829

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz des Institutes IWAR der Technischen Universität Darmstadt.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Cornel für die Übernahme des Referates und die intensive Auseinandersetzung mit der vorliegenden Arbeit.

Dank geht ebenfalls an Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Rolf Gimbel für die Übernahme des Korreferates und der damit verbundenen Arbeit.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban, der mir durch die Beschäftigung als wissenschaftliche Mitarbeiterin die Möglichkeit zum wissenschaftlichen Arbeiten und mir die Freiheit gegeben hat, eigene Ideen und Methoden umzusetzen.

Mein ganz besonderer Dank geht an Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Martin Wagner für die Ermöglichung dieser Arbeit sowie die außerordentliche und kontinuierliche Unterstützung als Projektleiter während der Durchführung der experimentellen Tätigkeiten, die die Voraussetzung zu dieser Arbeit sind.

Ich möchte mich bei Herrn Dr.-Ing. Stefan Gramel herzlich bedanken für die „Entdeckung“ meiner Person und damit der Ermöglichung der Anstellung, die diese Arbeit hervorbracht hat.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen netten und stets hilfsbereiten Arbeitskollegen des Fachgebietes Wasserversorgung und Grundwasserschutz und der anderen Fachgebiete des Institutes herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank geht ebenfalls an Frau Sonngard Doose, die während meiner Tätigkeit am Institut stets für alle Fragen der Organisation und Logistik ansprechbar war und mich darüber hinaus immer unterstützt hat.

Ich bedanke mich beim Werkleiter der Rheinwasseraufbereitungsanlage Biebesheim Herrn Walter Klupp für die unkomplizierte Ermöglichung des realen Betriebs meiner Membran-Versuchsanlage sowie die tatkräftige Unterstützung durch Herrn Friedrich Menger und die weiteren Mitarbeiter des Wasserwerkes. Das war für mich eine besonders positive Arbeitsatmosphäre.

Ich bedanke mich bei Herrn Reinhard Sobotta und Herrn Dr. Christoph Jung der Elma Ultraschalltechnik GmbH & Co KG in Singen, deren fachlicher Input bei den Versuchen erheblich zum Erfolg beigetragen hat.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Samsomatic GmbH und der Samson AG in Frankfurt für Ihren Einsatz.

Dank geht auch an meine liebe Freundin Sybille.

Ich danke meinen Eltern und meiner Familie für die unermüdliche und außerordentliche Unterstützung meiner Person, auch in schwierigen Phasen.

## **Wissenschaftlicher Werdegang**

Sonja Lauterborn, geboren in Göttingen/Niedersachsen

Abitur: 1992 in Darmstadt

Studium: Magisterstudiengang der Geografie mit den Nebenfächern Botanik und Chemie an der Technischen Universität Darmstadt (1992-2001)

Praktikum beim Umweltamt in Darmstadt (8/2000)

vertiefendes Studium im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie an der Technischen Universität Darmstadt (2001-2002)

Beruflicher

Werdegang: wissenschaftliche Hilfskraft am Institut WAR (1/2003-6/2004)

wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz am Institut WAR der TU Darmstadt (7/2004-10/2008)

Während dieser Zeit beschäftigte sie sich unter anderem mit der Ultraschallreinigung von Membranen zur Wasserfilterung und betreute eine Versuchsanlage, die die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lieferte.

Gewinnerin des 3. Preises beim UniTechSpin-Award 2008 mit der Gründungsidee: „Membrananlagen mit Ultraschall-Reinigungsverfahren“

## Anhang I

Analyseberichte des Zentrallabors der Hessenwasser GmbH & Co KG  
vom 5.11.2006. A- und B-Probe.

**Zentrallabor**

Gräfenhäuser Straße 118

64293 Darmstadt

Tel.: 069/25490-5231, Fax: -5009

Hessenwasser GmbH &amp; Co. KG · Taunusstraße 100 · 64521 Groß-Gerau

Institut WAR,  
Fachgebiet Wasserversorgung und  
Grundwasserschutz  
TU Darmstadt, Sonja Lauterborn  
Petersenstr. 13  
64287 Darmstadt

**Analysenbericht** (Teilbericht)**Analysen-Nr.:** 200632063**Probe:** Versuchsanlage Biebesheim, Permeatausgang Linie 1

Medium: Sonstiges  
Entnahmeanlass: Externe Proben  
Probenahme: 15.11.2006 09:00 Uhr  
durch: Herr Bierhals  
Probenart: Stichprobe

Kunden-Nr.: 180004  
Probeneingang: 15.11.2006  
Untersuchungsende:  
Befundausgabe: [B]

Richt- bzw. Grenzwertliste: Trinkwasserverordnung 2001

Parameter	Methode/Norm	Einheit	Ergebnis	Grenzwert
Geruch, qualitativ	DIN 38404 (B1.2)		ohne	
Geruchsschwellenwert	DIN 38404 (B1.2)	TON	1	3
Leitfähigkeit bei 25°C	DIN EN 27888 (C8)	µS/cm	606	
Leitfähigkeit bei 20°C	DIN EN 27888 (C8)	µS/cm	543	2500
Sauerstoff	DIN EN 25614 (G22)	mg/l	8,1	
Trübung	DIN EN ISO 7027 (C2-2)	FNU	0,02	1
Koloniezahl (22°C)	TrinkwVaF, Anl.1.Nr.5	KBE/ml		100
Koloniezahl (36°C)	TrinkwVaF, Anl.1.Nr.5	KBE/ml		100
Coliforme Keime	Colilert 18/ Quantitray	MPN/100ml	0	0
Escherichia coli	Colilert 18/ Quantitray	MPN/100ml	0	0
Enterokokken	ISO 7899-2	KBE/100ml		0
Färbung (SAK 436nm)	DIN EN ISO 7887 (C1-2)	1/m		0,5
Chlorid	DIN EN ISO 10304-1.2 (D19,D20)	mg/l	56,9	250
Eisen.gesamt	DIN EN ISO 11885 (E22)	mg/l	<0,005	0,2

Helmut Schneider (FBL)

Roland Grothe

**DACH**  
DACH-PL 0010-99-15Akkreditiert nach  
DIN EN ISO/IEC 17025

Die Prüfergebnisse beziehen sich auf die untersuchten Proben.  
Die Veröffentlichung und Vervielfältigung der Prüfberichte und Gutachten zu Werbezwecken sowie deren auszugsweise Verwendung in sonstigen Fällen bedürfen unserer schriftlichen Genehmigung.

**Zentrallabor**

Gräfenhäuser Straße 118  
64293 Darmstadt  
Tel.: 069/25490-5231, Fax: -5009

Hessenwasser GmbH & Co. KG - Taunusstraße 100 - 64521 Groß-Gerau

Institut WAR,  
Fachgebiet Wasserversorgung und  
Grundwasserschutz  
TU Darmstadt, Sonja Lauterborn  
Petersenstr. 13  
64287 Darmstadt

**Analysenbericht** (Teilbericht)

**Analysen-Nr.:** 200632064

**Probe:** Versuchsanlage Biebesheim, Permeatausgang Linie 1

Medium: Sonstiges  
Entnahmeanlass: Externe Proben  
Probenahme: 15.11.2006 09:30 Uhr  
durch: Herr Bierhals  
Probenart: Stichprobe

Kunden-Nr.: 180004  
Probeneingang: 15.11.2006  
Untersuchungsende:  
Befundausgabe: [B]

Richt- bzw. Grenzwertliste: Trinkwasserverordnung 2001

Parameter	Methode/Norm	Einheit	Ergebnis	Grenzwert
Geruch, qualitativ	DIN 38404 (B1.2)		ohne	
Geruchsschwellenwert	DIN 38404 (B1.2)	TON	1	3
Leitfähigkeit bei 25°C	DIN EN 27888 (C8)	µS/cm	589	
Leitfähigkeit bei 20°C	DIN EN 27888 (C8)	µS/cm	528	2500
Sauerstoff	DIN EN 25814 (G22)	mg/l	8,1	
Trübung	DIN EN ISO 7027 (C2-2)	FNU	0,02	1
Koloniezahl (22°C)	TrinkwVaF Anl.1.Nr.5	KBE/ml		100
Koloniezahl (36°C)	TrinkwVaF Anl.1.Nr.5	KBE/ml		100
Coliforme Keime	Coliert 18/ Quantitray	MPN/100ml	0	0
Escherichia coli	Coliert 18/ Quantitray	MPN/100ml	0	0
Enterokokken	ISO 7899-2	KBE/100ml		0
Färbung (SAK 436nm)	DIN EN ISO 7887 (C1-2)	1/m		0,5
Chlorid	DIN EN ISO 10304-1.2 (D19.D20)	mg/l	57,0	250
Eisen,gesamt	DIN EN ISO 11885 (E22)	mg/l	<0,005	0,2

Helmut Schneider (FBL)

Roland Grothe



**DACH**  
DACH-PL 06/04-10

Akkreditiert nach  
DIN EN ISO/IEC 17025

Die Prüfergebnisse beziehen sich auf die untersuchten Proben.  
Die Veröffentlichung und Vervielfältigung der Prüfberichte und Gutachten zu Werbezwecken sowie deren auszugsweise Verwendung in sonstigen Fällen bedürfen unserer schriftlichen Genehmigung.

## **Anhang II**

Hintergrunddaten aus den Messungen der Versuchsanlage der in der Arbeit verwendeten Grafiken im Excel-Format auf Datenträger.